

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI URBINO “Carlo Bo”

Dipartimento di Studi Umanistici - DISTUM

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA  
IN SCIENZE UMANE  
Curriculum PEDAGOGIA  
CICLO XXIX

IL COSTRUTTO DI MODELLO COME OSTACOLO EPISTEMOLOGICO  
UNA RIFLESSIONE SULLA DIDATTICA DELLA FISICA ALLA LUCE DELLA  
TEORIA DELLA TRASPOSIZIONE DIDATTICA

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE: M-PED/01

RELATORE  
Chiar.ma Prof.ssa Berta Martini

DOTTORANDO  
Dott. ssa Monica Tombolato

ANNO ACCADEMICO 2015/2016



*Alla mia famiglia*



# INDICE

INTRODUZIONE.....	3
<b>1    FISICA INGENUA E FISICA ESPERTA</b>	
1.1    TEORIE INTUITIVE E TEORIE SCIENTIFICHE: UN RAPPORTO PROBLEMatico .....	9
1.2    FISICA INTUITIVA: ALCUNI ESEMPI PARADIGMATICI CLASSICI .....	14
1.3    LA RISPOSTA PSICOPEDAGOGICA: I TEORICI DEL CAMBIAMENTO CONCETTUALE...	24
1.4    LA RISPOSTA DIDATTICO-DISCIPLINARE: LA TEORIA DELLA TRASPOSIZIONE DIDATTICA E IL COSTRUTTO DI OSTACOLO EPISTEMOLOGICO.....	34
1.5    DALLE MISCONCEZIONI AGLI OSTACOLI: MONDO NEWTONIANO VS MONDO REALE.....	39
<b>2    LA FISICA COME SAVOIR SAVANT: UN'ANALISI EPISTEMOLOGICA</b>	
2.1    I MODELLI COME MEDIATORI TRA TEORIA E REALTÁ.....	53
2.2    MODELLI FISICI VS MODELLI ASTRATTI.....	59
2.3    MODELLI TEORICI: DAI MODELLI DI PRINCIPI AI MODELLI RAPPRESENTAZIONALI ..	65
2.4    IL MODELLO DELL'OSCILLATORE LINEARE .....	75
2.5    L'IDEALIZZAZIONE.....	84
2.6    L'APPROSSIMAZIONE.....	92
2.7    PERCEZIONE DI SIMILARITÁ, MODELLIZZAZIONE DIRETTA, GENERALIZZAZIONE FORMALE .....	98

<b>3</b>	<b>LA FISICA COME SAVOIR À EINSEIGNER: UNA RIFLESSIONE SULLE CONDIZIONI DI POSSIBILITÀ DI UNA TRASPOSIZIONE DIDATTICA EPISTEMOLOGICAMENTE E PEDAGOGICAMENTE FONDATA</b>	
3.1	LA FISICA MATEMATIZZATA: PER UNA TRASPOSIZIONE EPISTEMOLOGICAMENTE E PEDAGOGICAMENTE FONDATA .....	103
3.2	IL LATO ALLIEVO-SAPERE: LE TEORIE CORNICE.....	111
3.3	IL LATO INSEGNANTE-SAPERE: LA CONOSCENZA TACITA NEI CASI ESEMPLARI E LE FILOSOFIE IMPLICITE .....	120
3.4	IL LATO INSEGNANTE-ALLIEVO : IL TERRENO COMUNE CONDIVISO .....	133
<b>4</b>	<b>VERSO UNA TASSONOMIA DEGLI OSTACOLI</b>	
4.1	LE RAGIONI PER UNA TASSONOMIA DEGLI OSTACOLI .....	145
4.2	I PRESUPPOSTI-OSTACOLO ALL'ORIGINE DELLA RAPPRESENTAZIONE MATEMATICA DELLA NATURA.....	150
4.3	IL "GAP" TRA TEORIA ED ESPERIENZA: IL PROBLEMA DEGLI "ACCIDENTI".....	164
4.4	OSTACOLI DI NATURA FISICA E IDEALIZZAZIONE.....	175
4.5	OSTACOLI DI NATURA MATEMATICA E APPROSSIMAZIONE .....	185
4.6	OSTACOLI PERCETTIVI E GENERALIZZAZIONE .....	191
4.7	LA VALIDAZIONE EMPIRICA DEL MODELLO: GRADI DI SOMIGLIANZA E BONTÀ DELLE APPROSSIMAZIONI .....	201
	APPENDICE.....	213
	BIBLIOGRAFIA.....	215

# Introduzione

*La separazione delle discipline è semplicemente un fatto di convenienza umana [...] i fenomeni più interessanti sono quelli che rompono e travalicano le barriere tra i vari campi del sapere.*

*R. Feynman*

Il quesito attorno a cui si sviluppa il presente lavoro concerne l'influenza delle "teorie" ingenuie sugli apprendimenti formali degli studenti nel campo della fisica, tema dalla cifra spiccatamente interdisciplinare in cui s'intrecciano questioni che, per la loro risonanza sul piano educativo, non possono essere eluse nello specifico ambito di riflessione pedagogica intitolato alla "pedagogia dei saperi"<sup>1</sup> entro cui si iscrive questa tesi.

Sebbene il rapporto tra fisica ingenua e fisica esperta sia stato molto indagato – come peraltro testimonia l'ampia messe di studi fiorita intorno alle concezioni spontanee degli studenti già a partire dagli anni '70 del secolo scorso –, le difficoltà sollevate da tale complessa relazione appaiono tutt'altro che appianate: ancora oggi l'apprendimento significativo<sup>2</sup> della disciplina rappresenta uno scoglio cognitivo contro cui si infrangono gli ingenui tentativi dei professori di scienze, convinti di poter imprimere nella mente degli allievi il sapere di cui sono latori, senza tenere in debito conto le

---

<sup>1</sup> B. Martini, *Pedagogia dei saperi: problemi, luoghi e pratiche per l'educazione*, Franco Angeli, Milano, 2011.

<sup>2</sup> Sul costrutto di "apprendimento significativo" si rinvia a D. P. Ausubel, *Educazione e processi cognitivi: guida psicologica per gli insegnanti*, Franco Angeli, Milano, 1998.

conoscenze informali che, fin dall'infanzia, essi costruiscono attraverso l'interazione con l'ambiente naturale e culturale.

A sollevare per primo il problema l'epistemologo francese Gaston Bachelard che ne *La formazione dello spirito scientifico* lancia il seguente monito:

In educazione, la nozione di ostacolo epistemologico è ugualmente misconosciuta. Sono rimasto spesso colpito dal fatto che i professori di scienze, più ancora degli altri se questo è possibile, non comprendono che non si comprenda... I professori di scienze immaginano che lo spirito scientifico cominci come una lezione, che si possa far comprendere una dimostrazione ripetendolo punto per punto. Essi non hanno riflettuto al fatto che l'adolescente arriva alla classe di fisica con delle conoscenze empiriche già costituite: si tratta allora non di acquisire una cultura sperimentale, ma piuttosto di cambiare cultura sperimentale, di abbattere gli ostacoli già accumulati nella vita quotidiana<sup>3</sup>.

Di qui una chiave di lettura per poter interpretare le misconcezioni dei discenti a cui lo studioso francese Guy Brousseau – artefice e fondatore della Didattica della Matematica come disciplina scientifica<sup>4</sup> – si ispirerà per elaborare una vera e propria “teoria degli ostacoli” che si frappongono all'apprendimento di tale specifico sapere<sup>5</sup>.

L'aspetto importante sotteso al concetto di ostacolo epistemologico è il suo alludere non a un'assenza di conoscenza bensì a una conoscenza differente rispetto a quella scientificamente accreditata; si prospetta così uno scenario completamente diverso rispetto a quello tradizionalmente concepito: il discente non è più una *tabula rasa*, pronto a recepire passivamente il flusso di informazioni trasmesse, ma un attivo costruttore di conoscenza che dispone di un sapere informale, appreso perlopiù in contesti quotidiani, con il quale il docente deve saper interagire.

---

<sup>3</sup> G. Bachelard, *La formazione dello spirito scientifico: contributo a una psicoanalisi della conoscenza oggettiva*, R. Cortina, Milano, 1995, p. 17.

<sup>4</sup> B. D'Amore, «Prefazione» in G. Brousseau, *Ingegneria didattica ed Epistemologia della Matematica*, Pitagora, Bologna, 2008, pp. VII-IX, p. VII.

<sup>5</sup> Sulla “teoria degli ostacoli” si rinvia a B. Martini, *Didattiche disciplinari. Aspetti teorici e metodologici*, Pitagora, Bologna, 2000, pp. 89-102.



Sullo sfondo di questa premessa si colloca la nostra scelta di inquadrare la relazione tra fisica ingenua e fisica esperta all'interno del paradigma didattico-disciplinare che, restituendo centralità al sapere, ne mette in luce l'intrinseco potere formativo, offrendo strumenti concettuali idonei a contemperare tanto le istanze dell'oggetto quanto quelle del soggetto, in linea con un'opzione teorica di matrice problematicista<sup>6</sup>. Inserendoci all'interno di questa cornice concettuale non intendiamo misconoscere la natura interdisciplinare del problema, ma semplicemente circoscriverne i confini, focalizzando l'attenzione su uno degli scogli cognitivi che segna l'apprendimento della fisica, ovvero l'utilizzo di modelli ideali per interpretare la realtà empirica. Filo conduttore dell'intero percorso teorico è infatti la convinzione – maturata sulla base dello studio dell'ampia letteratura critica di riferimento, nazionale e internazionale, nonché confermata e alimentata dall'esperienza didattica universitaria e non, svolta nel corso dell'ultimo decennio – che alcune misconcezioni nel campo della meccanica classica (a cui è circoscritto il lavoro di ricerca) siano connesse a questioni di ordine epistemologico inerenti il rapporto tra scienza e esperienza, questioni spesso sottovalutate se non addirittura misconosciute nell'ambito dell'insegnamento tradizionale. Con la fisica galileiano-newtoniana si apre, infatti, un “gioco linguistico” differente da quello quotidiano, un gioco che inaugurando prassi epistemiche di un nuovo genere rispetto alle prassi ordinarie strettamente connesse ai bisogni della vita e ai suoi orizzonti pratici, risponde a regole affatto diverse da quelle a cui ci ha abituato l'esperienza pratico-percettiva del mondo.

Di qui l'esigenza di guardare alla relazione tra fisica ingenua e fisica esperta attraverso i costrutti didattico-disciplinari di ostacolo epistemologico e di trasposizione didattica, i quali consentono di illuminare il problema da una nuova e fertile prospettiva capace di conciliare e integrare l'istanza

---

<sup>6</sup> Per un approfondimento sul problematicismo si rinvia a M. Baldacci, *Il problematicismo: dalla filosofia dell'educazione alla pedagogia come scienza*, Lecce, Milella, 2003.

eterocentrica di aderenza epistemologica al sapere esperto con quella puerocentrica di ricerca delle condizioni pedagogiche del suo apprendimento. Da un lato, infatti, la teoria della trasposizione didattica permette di superare l'inadeguatezza del paradigma applicazionista di matrice psicopedagogica, richiamando l'attenzione sull'insieme dei processi che realizzano la "messa in forma didattica" dei saperi in rapporto ad una loro possibile forma scientifica<sup>7</sup>. Dall'altro, grazie alla nozione di ostacolo epistemologico è possibile informare i docenti dei nodi teorici costitutivi dell'evoluzione del sapere stesso, così da favorire sia una loro adeguata gestione sul piano didattico, sia una corretta interpretazione delle misconcezioni degli studenti a partire dai tipi logici di ostacoli con cui possono essere messe in relazione.

Il lavoro, strutturato in quattro capitoli, si apre (Cap. 1. *Fisica Ingenua e Fisica Esperta*) con una disamina di alcuni degli studi più rappresentativi sulle concezioni di fisica ingenua maggiormente diffuse e radicate, che include, oltre ai classici lavori di Bozzi, McCloskey e Caramazza – per citarne solo alcuni – le più recenti ricerche sul cambiamento concettuale nell'ambito della psicologia dello sviluppo e dell'educazione. Successivamente a una riformulazione del problema all'interno della cornice teorica didattico-disciplinare, si introduce l'ipotesi di lavoro che anima il presente contributo – ovvero la questione epistemologica dei rapporti tra scienza ed esperienza quale ostacolo all'apprendimento formale della fisica –, giustificando la sua plausibilità sulla base dei risultati di un'indagine esplorativa – senza fini statistici ma solo conoscitivi – condotta su studenti del corso di laurea in Scienze della Formazione Primaria, iscritti

---

<sup>7</sup> B. Martini, «La didattica delle discipline», in M. Baldacci (a cura di), *L'insegnamento nella scuola secondaria*, Tecnodid, Napoli, 2012, pp. 37-54; E. Damiano, *Il sapere dell'insegnare*, FrancoAngeli, Milano, 2007.

ai laboratori di Fisica coordinati da chi scrive durante il secondo semestre dell'a.a. 2013-2014 e il primo semestre dell'a.a. 2014-2015.

Nel secondo capitolo (Cap. 2. *La Fisica come Savoir Savant: un'analisi epistemologica*), assumendo la postura del *savoir savant*, si analizza la fisica in chiave epistemologica al fine di metterne in luce il rapporto *mediato* con i fatti dell'esperienza. La fisica, infatti, si riferisce alla realtà solo in maniera indiretta, attraverso l'utilizzo di modelli ovvero di sistemi idealizzati connessi ai sistemi reali da una relazione di somiglianza "selettiva" – secondo aspetti e gradi specificati – istituita da agenti intenzionali attraverso opportune prassi epistemiche ovunque presupposte, ma mai oggetto di tematizzazione diretta.

La complessità e le annesse difficoltà di organizzare e amministrare una trasposizione didattica che non tradisca la forma scientifica del sapere salvaguardandone al contempo la valenza formativa, vengono discusse e problematizzate (Cap. 3. *La Fisica come Savoir à Enseigner: una riflessione sulle condizioni di possibilità di una trasposizione didattica epistemologicamente e pedagogicamente fondata*) attraverso un'analisi del sistema didattico insegnante-allievo-sapere volta ad evidenziare – per ciascuno dei suoi sottosistemi (allievo-sapere, insegnante-sapere, insegnante-allievo) – le potenziali cause del loro disfunzionamento alla luce delle misconcezioni rilevate dalla ricerca empirica e di quanto emerso durante i laboratori di fisica. Ne consegue l'esigenza d'intraprendere una chiarificazione del senso delle regole che governano il gioco linguistico "rappresentare mediante un modello", attraverso una ricostruzione della genesi epistemica di tale nozione che, all'interno della prospettiva didattico-disciplinare, si traduce nell'esibizione degli ostacoli epistemologici (di alcuni perlomeno) sottesi alla sua nascita, al suo sviluppo e alla sua applicazione.

Nel capitolo conclusivo (Cap. 4. *Verso una tassonomia degli ostacoli*), interrogando in chiave epistemologica alcune fonti storiche, si cerca di

conciliare le istanze del soggetto – messe in luce dagli studi psicopedagogici nel campo della fisica ingenua e del cambiamento concettuale – con quelle riconducibili alla natura dell’oggetto – emerse dall’analisi della fisica come *Savoir Savant* – abbozzando una “piattaforma problematica” che stimoli i docenti ad un’analisi critica delle proprie assunzioni epistemologiche implicite, aiutandoli al contempo a comprendere e a contestualizzare opportunamente le idee spontanee dei discenti. Il tentativo di “operazionalizzare” il macro-ostacolo rappresentato dalla peculiare modalità con cui la fisica si rapporta all’esperienza – ipotizzato all’inizio per spiegare la persistenza di alcune misconcezioni rilevate dalla ricerca empirica – si traduce così nella costruzione di una tassonomia di ostacoli di differente livello logico di generalità sottesi al processo di modellizzazione che caratterizza l’odierna prassi scientifica.

# *Fisica Ingenua*

*e*

# *Fisica Esperta*

## *1. Teorie intuitive e teorie scientifiche: un rapporto problematico*

L'influenza dei saperi ingenui sulle acquisizioni formali dei discenti è tema consolidato della letteratura specialistica a carattere psico-pedagogico e didattico sia per la sua rilevanza rispetto alla definizione delle condizioni di possibilità dell'apprendimento, sia per il suo costituire un problema trasversale alle varie discipline: ogni dominio disciplinare, infatti, possiede come correlato un insieme più o meno nutrito, articolato e interconnesso di concezioni intuitive che spesso, sebbene non sempre, fungono da contraltare a quelle scientificamente accreditate<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> A. E. Berti, «Cambiamento concettuale e insegnamento», *Scuola e città*, 1, 2000, pp. 18-38, disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.edscuola.it/archivio/antologia/scuolacitta/berti.pdf>.

Tra i primi a porre al centro del dibattito educativo l'impatto degli stereotipi infantili sulla qualità dei processi didattici è lo psicologo Howard Gardner: promotore di un'autentica «educazione al comprendere» volta a scardinare la tendenza, invalsa nella scuola tradizionale, a privilegiare la trasmissione di conoscenze dichiarative, Gardner sostiene la necessità di favorire nel discente l'acquisizione di «un'adeguata padronanza di concetti, principi e abilità» che gli permetta di fronteggiare situazioni inedite, unitamente alla capacità di arricchire autonomamente la propria strumentazione concettuale qualora insufficiente rispetto all'obiettivo da raggiungere<sup>2</sup>.

Tale ambizioso obiettivo richiede, tuttavia, una preliminare ricognizione degli «apprendimenti intuitivi o naturali»<sup>3</sup> che gli studenti interiorizzano mediante la regolare e attiva esplorazione della realtà: le “miniteorie”<sup>4</sup> sul funzionamento del mondo materiale, psichico e sociale che elaborano fin dall'infanzia, se inizialmente rappresentano degli strumenti utili per conferire, almeno provvisoriamente, un senso ai fenomeni naturali e agli accadimenti del quotidiano, finiscono troppo spesso, infatti, per cristallizzarsi in schemi mentali inamovibili resistenti alla scolarizzazione. All'interno del paradigma costruttivista – che rivendica il carattere dinamico dell'acquisizione della conoscenza, riconoscendo il ruolo attivo del soggetto – si parla, a questo proposito, di “concezioni ingenuie” ovvero di credenze di senso comune dal carattere prevalentemente irriflessivo che si interpongono, fungendo da filtro, ai nuovi contenuti di apprendimento, i quali vengono dunque interpretati e non semplicemente registrati<sup>5</sup>.

---

<sup>2</sup> H. Gardner, *Educare al comprendere. Stereotipi infantili e apprendimento scolastico*, Feltrinelli, Milano, 1996, p. 28

<sup>3</sup> H. Gardner, *Educare al comprendere*, cit., p. 160.

<sup>4</sup> Gardner chiarisce come il termine “teoria” non debba essere interpretato in senso letterale, ma vada piuttosto inteso come “insieme di credenze organizzate” sul funzionamento del mondo, utilizzate dai bambini in maniera regolare e generativa per trarre nuove inferenze. H. Gardner, *Educare al comprendere*, cit., p. 95.

<sup>5</sup> All'interno di tale paradigma, la *learning theory* comportamentista viene sostituita da un apprendimento inteso come processo costruttivo volto a elaborare le nuove conoscenze

Come sottolinea Gardner:

Questo formidabile complesso “costruito in proprio” di teorie, competenze, idee e propensioni, i bambini lo portano con sé a scuola; e, naturalmente, è un tessuto che, a sua volta, influisce notevolmente sul modo in cui i giovani studenti imparano le nozioni nuove che vi incontrano.[...]. Poiché né i bambini stessi né gli adulti sono stati consapevoli di queste teorie, una volta che incominci la scolarizzazione formale, esse tendono a venire ignorate. Tuttavia, anziché dissolversi come avrebbe desiderato Piaget e certi altri educatori, le teorie intuitive restano potenti mezzi di conoscenza e possono benissimo riemergere con tutta la loro forza una volta che la persona lasci l’ambiente scolastico<sup>6</sup>.

Ne consegue come la possibilità di attivare apprendimenti significativi ed efficaci finalizzati allo sviluppo di una “mente disciplinare”<sup>7</sup> sia subordinata alla presa in carico, da parte dei docenti cui appunto è affidato il compito di educare attraverso i saperi, del *corpus* di conoscenze intuitive dei discenti; contrariamente alle ottimistiche previsioni di Piaget, esse, infatti, non si dissolvono spontaneamente così come spontaneamente si sono formate, ma rappresentano il bagaglio culturale, rassicurante e stabile, a cui attingere in presenza di ostacoli di natura epistemologica, ontogenetica e/o didattica<sup>8</sup>. Pertanto, argomenta lo psicologo,

solo se queste teorie intuitive verranno riconosciute e affrontate, sarà possibile per il bambino (e per il suo maestro) stabilire in quali circostanze devono continuare a valere, quando non sono pertinenti e quando sono in contrasto con quelle

---

sulla base di quelle preesistenti nella memoria a lungo termine. L. Mason, *Psicologia dell'apprendimento e dell'istruzione*, Il Mulino, Bologna, 2007, pp. 32-33.

<sup>6</sup> H. Gardner, *Educare al comprendere*, cit., p. 95.

<sup>7</sup> Sul fertile costrutto di “mente disciplinare” si rinvia a B. Martini, «La mente disciplinare ovvero il rapporto mente-saperi alla luce della prospettiva modularista», in G. Annacontini, R. Gallelli (a cura di), *Formare altre(i)menti*, Progedit, Bari, 2014, pp. 128-147.

<sup>8</sup> Gli ostacoli epistemologici sono legati alla natura intrinseca del sapere, quelli didattici all’attività dell’insegnante che mette in atto strategie didattiche più o meno efficaci mentre quelli ontogenetici alle capacità proprie dell’età mentale del discente. Questa distinzione, che risponde alla “teoria degli ostacoli” formulata da Guy Brousseau ispirato dall’opera dell’epistemologo francese Gaston Bachelard, viene chiaramente formulata e discussa in B. Martini, *Didattiche disciplinari: aspetti teorici e metodologici*, Pitagora, Bologna, 2000, pp. 89-102, a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

conoscenze o quelle credenze più formali sviluppate nella cultura di appartenenza, che la scuola ha il compito di trasmettere<sup>9</sup>.

Ne consegue, dunque, come

un'educazione al comprendere [possa] realizzarsi solo se gli studenti in qualche modo diventano capaci di integrare i modi di conoscere prescolastici con quelli scolastici e disciplinari o anche, qualora tale integrazione non si riveli possibile, di accantonare le forme di pre conoscenza prescolastiche per rimpiazzarle con quelle scolastiche. Gli studenti, infine, devono essere in grado di capire quand'è che una forma prescolastica di conoscenza può approdare a una forma di comprensione diversa e magari più profonda di quella legata alla prospettiva disciplinare appresa a scuola<sup>10</sup>.

L'acquisizione di una *forma mentis* conforme alla logica intrinseca propria di ciascuna disciplina<sup>11</sup> non può, pertanto, che rivelarsi un processo lento e graduale, scandito da forme alternative di "rapporto al sapere"<sup>12</sup>, forme che lo psicologo esemplifica attraverso tre figure ideal-tipiche – il discente intuitivo, lo studente tradizionale e l'esperto disciplinare<sup>13</sup> – interpretabili, almeno in linea di principio, come momenti necessari di un processo dialettico teso al raggiungimento della «vera comprensione»<sup>14</sup>.

Discenti intuitivi, secondo Gardner, sono tutti i bambini che, molto prima di ricevere un'istruzione formale, sviluppano spontaneamente modelli esplicativi del mondo fisico e del comportamento delle persone, conformemente al bisogno innato dell'essere umano di dare un senso a ciò

---

<sup>9</sup> H. Gardner, *Educare al comprendere*, cit., p. 95.

<sup>10</sup> Ivi, p. 160.

<sup>11</sup> Per una discussione approfondita sul potere formativo dei saperi si rinvia a B. Martini, «Il valore formativo delle discipline», *Musica e storia*, XIV(3), 2006, pp. 503-509.

<sup>12</sup> Su questo costrutto elaborato originariamente da Yves Chevallard si rinvia a B. Martini, *Pedagogia dei saperi*, cit., pp. 118-127; M. L. Schubauer Leoni, «Rapporto al sapere del docente e decisioni didattiche in classe», in B. D'Amore (a cura di), *Didattica della matematica e realtà scolastica*. Atti dell'omonimo Convegno nazionale, Castel San Pietro Terme (1997), Pitagora, Bologna, 1997, pp. 53-60; Y. Chevallard, «Concepts fondamentaux de la didactique: perspectives apportées par une approche anthropologique», *Recherches en didactique des mathématiques*, 12 (1), 1992, pp. 73-112.

<sup>13</sup> H. Gardner, *Educare al comprendere*, cit., pp. 16-17.

<sup>14</sup> Ivi, p. 16.



che accade. Alla seconda categoria appartengono invece coloro che, formati secondo i tradizionali curricula scolastici, forniscono in genere prestazioni conformi agli standard richiesti dai docenti ottenendo talvolta valutazioni molto elevate, ma che si rivelano totalmente inadeguati nella risoluzione di problemi differenti da quelli a cui sono stati “addestrati”. Privi di reali competenze disciplinari<sup>15</sup>, tali studenti dispongono solamente di conoscenze dichiarative e procedurali legate a qualche specifico contesto, un sapere e un saper fare che non sono tuttavia sufficienti a inibire risposte di senso comune analoghe a quelle che potrebbe fornire un qualunque bambino in età prescolare. In riferimento a ciò Gardner parla di incapacità da parte di docenti e studenti di «assumersi i rischi del comprendere» attraverso un atteggiamento critico e costruttivo di fronte agli errori: cercando costantemente di evitarli, sacrificano così al «compromesso delle risposte corrette»<sup>16</sup> l’acquisizione di una conoscenza veramente autentica. In ultimo ritroviamo i cosiddetti esperti disciplinari, categoria in cui possono essere riuniti i soggetti che, a prescindere dall’età, abbiano guadagnato competenza in una specifica disciplina così da poter agevolmente disporre dei suoi peculiari strumenti concettuali, operativi ed ermeneutici per affrontare situazioni nuove. L’affinità tra l’idea di competenza e quella di comprensione gardneriana – osserva Berta Martini – riposa quindi sul loro comune implicare, da parte del soggetto, non solo «la capacità d’uso delle risorse interne disponibili (le conoscenze e le abilità possedute fino a quel momento), ma anche il loro trasferimento in contesti (compiti o situazioni) diversi da quelli in cui quelle conoscenze e quelle abilità sono state originariamente apprese»<sup>17</sup>. In questo senso, dunque, «la comprensione,

---

<sup>15</sup> Per un approfondimento sull’idea di competenza disciplinare si rinvia B. Martini, «Le competenze disciplinari», *La rivista di pedagogia e di didattica*, 3/4, 2005, pp.135-140.

<sup>16</sup> Ivi, p. 160.

<sup>17</sup> B. Martini, «Riflessioni critiche sul concetto di competenza», *Pedagogia più Didattica. Teorie e pratiche educative*, 0, 2007, pp. 101-106, in particolare p. 102; Cfr. H. Gardner, *Educare al comprendere*, cit., p. 19.

anziché essere inglobata come processo cognitivo nel concetto di competenza, coincide con la possibilità stessa dell'esercizio di questa»<sup>18</sup>.

Che la successione secondo cui sono state presentate queste figure non sia, tuttavia, indicativa dell'effettiva linearità del percorso che conduce o meglio che dovrebbe condurre dall'iniziale apprendimento intuitivo alla competenza disciplinare in cui la «comprensione vera» si manifesta, lo dimostra in maniera eclatante – a giudizio dello stesso Gardner – proprio il caso dell'insegnamento della fisica attorno a cui è centrato il presente lavoro.

## 2. *Fisica ingenua: alcuni esempi paradigmatici classici*

Apripista del filone di ricerche sui saperi ingenui, i primi studi sulle concezioni intuitive nel campo della fisica compaiono sul panorama internazionale già a partire dagli anni '70, quando psicologi ed esperti di didattica iniziano a rilevare reminiscenze pregalileiane in persone che, per il tipo di formazione ricevuta, era presumibile dovessero avere una ragionevole familiarità con i concetti portanti della meccanica newtoniana. Tra gli esempi più clamorosi ricordiamo le interpretazioni aristoteliche della caduta dei gravi e della traiettoria dei corpi in movimento messe in luce rispettivamente da Benny Shanon<sup>19</sup> e Robert J. Whitaker<sup>20</sup>, che illustrano puntualmente – soprattutto i casi citati da Whitaker<sup>21</sup> – le criticità sollevate da Gardner in merito al rapporto tra discente scolarizzato ed esperto disciplinare. Un discorso analogo vale per la ricerca condotta da Audrey B.

---

<sup>18</sup> *Ibidem*.

<sup>19</sup> B. Shanon, «Aristotelianism, Newtonianism and the physics of the layman», *Perception*, 5(2), 1976, pp. 241-243.

<sup>20</sup> R. J. Whitaker, «Aristotle is not dead: Student understanding of trajectory motion», *American Journal of Physics*, 51(4), 1983, pp. 352-357.

<sup>21</sup> *Ivi*, p. 355.

Champagne, Leopold E. Klopfer e John H. Anderson<sup>22</sup> dell'Università di Pittsburg, dove dall'analisi dei protocolli delle risposte fornite da studenti iscritti ai corsi preparatori del curriculum per fisici, emerge una meccanica ingenua fondata su quattro assunti fondamentali: una forza esercitata su un corpo gli imprime velocità causandone il movimento; esercitando su un oggetto una forza costante la sua velocità si mantiene costante; l'intensità della velocità è proporzionale all'intensità della forza; se non sono sottoposti all'influsso di forze gli oggetti sono in quiete o, se sono inizialmente in movimento, rallentano fino a fermarsi<sup>23</sup>.

I commenti degli autori sulla base di tali risultati depongono a favore di una fisica intuitiva di stampo aristotelico – sebbene scongiurino l'ipotesi di conoscenze dirette dell'opera del filosofo greco – suggerita dall'esperienza quotidiana con oggetti che risentono della presenza di attriti e resistenze, fisica in cui non trova posto il concetto di accelerazione a causa dell'insensibilità dell'occhio umano nel rilevare le variazioni di velocità di un corpo in moto<sup>24</sup>.

All'interno dello stesso filone di studi si colloca anche il classico lavoro di Alfonso Caramazza, Michael McCloskey e Bert Green *Curvilinear motion in the absence of external forces: naive beliefs about the motion of objects*<sup>25</sup>, seguito a breve da un altro studio degli stessi autori sulle misconcezioni

---

<sup>22</sup> A. B. Champagne, L. E. Klopfer, J. H. Anderson, «Factors Influencing the Learning of Classical Mechanics», *American Journal of Physics*, 48(12), 1980, pp. 1074-1079.

<sup>23</sup> Ivi, p. 1077. Per un commento dettagliato si rinvia a P. Bozzi, *Fisica ingenua. Oscillazioni, piani inclinati e altre storie: studi di psicologia della percezione*, Garzanti Milano, 1990, p. 31.

<sup>24</sup> Su questo aspetto – rilevato anche da Whitaker – che il percettologo Paolo Bozzi pone alla base della diffusa convinzione che gli oggetti in caduta si muovano di moto uniforme si rinvia a S. Runeson, «Constant velocity – Not perceived as such», *Psychological Research*, 37(1), 1974, pp. 3-23; G. P. Bingham, S. Runeson, «On describing what is perceived: Seeing “velocity” versus seeing “push” in moving objects». Paper presented at the meeting of the International Society for Ecological Psychology (October, 1983), Nashville (TN); P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., pp. 306-314.

<sup>25</sup> A. Caramazza, M. McCloskey, B. Green, «Curvilinear motion in the absence of external forces: naive beliefs about the motion of objects», *Science* 210 (4474), 1980, pp. 1139-1141.

riguardanti le traiettorie degli oggetti<sup>26</sup>, nei quali l'attenzione si sposta dal paradigma aristotelico alla teoria medievale dell'*impetus*<sup>27</sup>. Ai quesiti somministrati dai ricercatori gli studenti esaminati rispondevano, infatti, secondo una logica coerente con i tre capisaldi della teoria medievale, dei quali i primi due erano condivisi anche dagli studenti testati da Champagne e colleghi: il moto di un oggetto richiede l'azione continua di una forza; indipendentemente dalla presenza di attriti, l'esaurirsi della forza comporta l'estinguersi del moto; il corpo lanciato conserva la direzione originariamente impressa al momento del lancio.

Tra i semplici problemi "carta-e-matita" presentati agli studenti ricordiamo quello dei tubi a spirale, discusso e commentato anche dal percettologo Paolo Bozzi nel suo celebre testo sulla *Fisica ingenua*: interrogati sul percorso che, trascurando attriti e resistenza dell'aria, avrebbero seguito delle palline di metallo all'uscita<sup>28</sup> dei tubi variamente ricurvi all'interno dei quali erano state precedentemente soffiate, buona parte degli intervistati – sia senza, sia con una preparazione di fisica – tracciava linee curve, mostrando in questo modo d'ignorare completamente il principio d'inerzia. Una situazione simile si riproponeva in occasione di un altro esperimento – dal punto di vista della meccanica newtoniana analogo al precedente – concernente il lancio di un peso secondo l'antica arte della frombola: una palla metallica, fissata all'estremità di una corda e fatta roteare dal lanciatore sopra la sua testa fino ad acquistare un'elevata velocità, a un certo punto si sgancia proseguendo lungo una certa traiettoria. Il 30% degli studenti chiamati ad indicare il percorso seguito dalla palla una volta liberata dal vincolo che la faceva muovere circolarmente disegnavano,

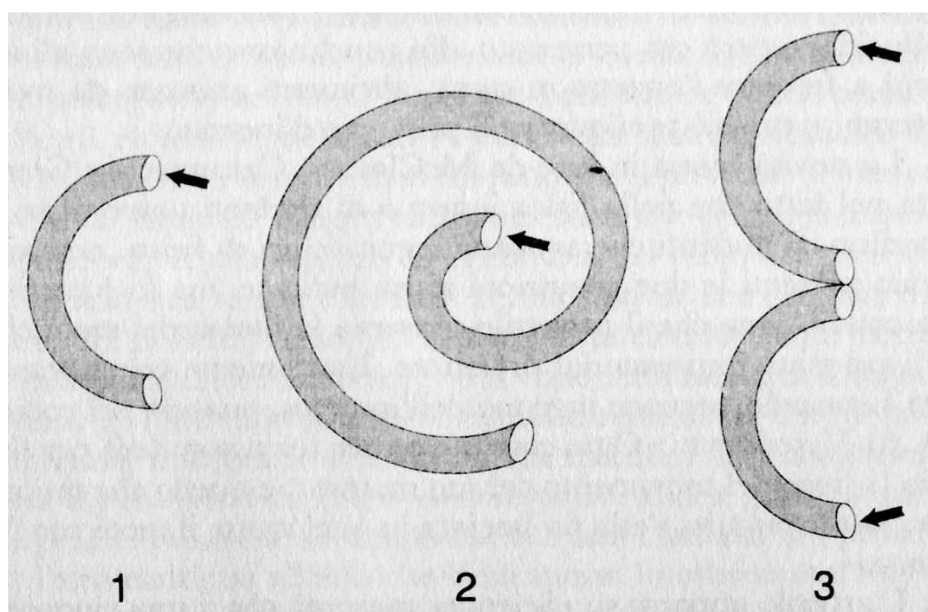
---

<sup>26</sup> A. Caramazza, M. McCloskey, B. Green, «Naive beliefs in "sophisticated" subjects: Misconceptions about trajectories of objects», *Cognition* 9(2), 1981, pp. 117-123.

<sup>27</sup> Per maggiori dettagli sulla teoria dell'*impetus* si rinvia a M. Clagett, *La scienza della meccanica nel medioevo*, Feltrinelli, Milano, 1981.

<sup>28</sup> Specificando che la velocità in uscita delle palline doveva essere considerata la medesima. P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., p. 34.

incuranti – come nel caso dei tubi – della prima legge del moto, linee incurvate in accordo con il percorso seguito in precedenza.



**Fig. 1** Il problema dei tubi ricurvi<sup>29</sup>

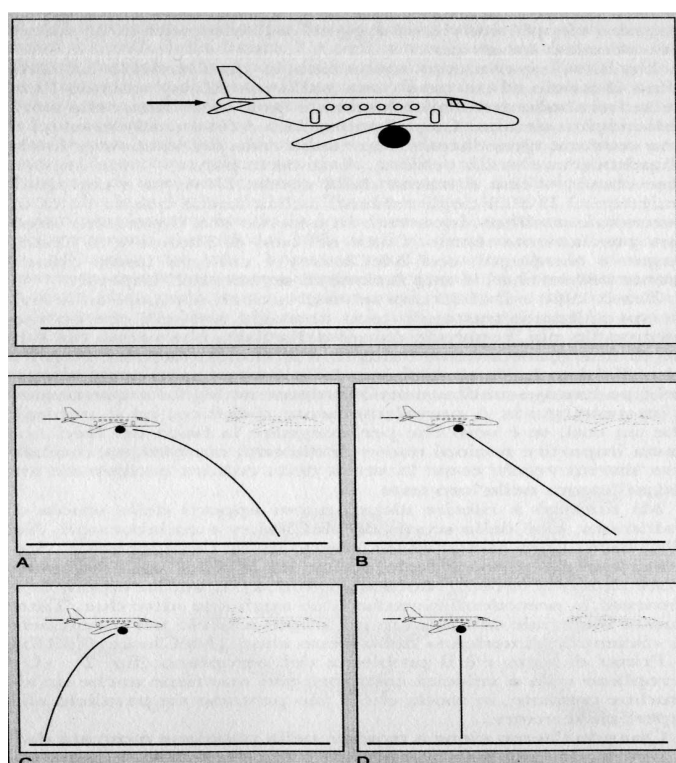
Altri esempi paradigmatici di fisica ingenua – che rappresentano varianti del moto dei proiettili e del problema della composizione dei moti ampiamente discussi da Galileo nella Quarta Giornata dei *Discorsi*<sup>30</sup> – sono riportati in due importanti lavori siglati da McCloskey nel 1983<sup>31</sup>. Nel cosiddetto problema dell'aeroplano si chiedeva d'individuare – trascurando il vento e la resistenza dell'aria – la traiettoria seguita da una palla metallica sganciata

<sup>29</sup> Immagine tratta da P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., p. 34.

<sup>30</sup> G. Galilei (1638), *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, a cura di Enrico Giusti, Einaudi, Torino, 1990. Sui problemi citati si pronuncia anche R. J. Whitaker, «Aristotle is not dead: Student understanding of trajectory motion», cit., a cui si rinvia per ulteriori approfondimenti.

<sup>31</sup> M. McCloskey, «Fisica intuitiva», *Le Scienze*, 178, 1983, pp. 108-118; M. McCloskey, «Naive Theories of Motion», in D. Gentner e A. L. Stevens (a cura di), *Mental Models*, LEA, Hillsdale (NJ), 1983, pp. 299-324. Per un loro dettagliato commento si rinvia a P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., pp. 35-39.

dall'aeromobile in volo ad altitudine e a velocità costanti, nonché la posizione dell'aereo nel momento in cui la palla tocca terra.

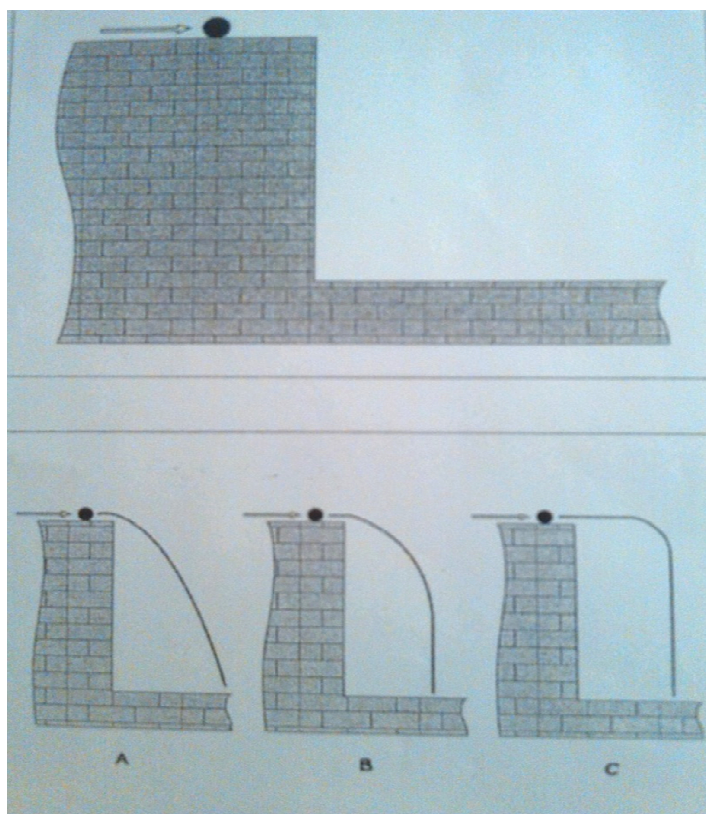


**Fig. 2** Il problema dell'aeroplano e relative soluzioni proposte<sup>32</sup>

Dei 48 soggetti interpellati solo il 40% rispose correttamente (A), mentre il restante 60%, rappresentativo dei “fisici ingenui”, scelse alternative, osserva puntualmente Bozzi, di chiara ascendenza aristotelica, benché McCloskey fosse incline ad assimilare tali risultati allo schema della teoria dell'*impetus*. Secondo l'interpretazione offerta dal percettologo, infatti, la soluzione B (selezionata dal 13% degli esaminati) esemplifica l'inveterata credenza nella caduta con moto uniforme, la soluzione D (36%), con la sua traiettoria

<sup>32</sup> Immagine tratta da P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., p. 36.

perfettamente verticale, indica la mancata conoscenza del principio d'inerzia, mentre la soluzione C (11%) è paragonabile alla soluzione D, considerata non dal punto di vista di un osservatore esterno solidale con la terra, ma di un ideale passeggero seduto sull'aereo.



**Fig. 3** Il problema dello strapiombo e relative soluzioni<sup>33</sup>

Maggiormente orientati alla teoria dell'*impetus* sono invece i risultati ottenuti da McCloskey attraverso un altro tipo di prova in cui veniva chiesto agli studenti di contrassegnare, tra le opzioni disponibili, la corretta traiettoria di caduta di una palla di ferro, giunta all'orlo di uno strapiombo, dopo aver rotolato a 50 miglia all'ora lungo un piano perfettamente levigato.

<sup>33</sup> Immagine tratta da P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., p. 38.

Sebbene la maggioranza delle risposte sia ricaduta sulla soluzione “A”, conforme alle leggi della meccanica newtoniana, oltre il 20% degli studenti, convergendo sulle alternative “B” e “C” coerenti con la teoria dell’*impetus*, attesta la sopravvivenza di certe concezioni spontanee anche in coloro che sono stati introdotti ai principi della fisica classica.

Secondo gli autori delle ricerche summenzionate, le conclusioni – condivise dallo stesso Gardner così come da molti altri studiosi<sup>34</sup> che indagano il fenomeno della fisica ingenua prevalentemente dal punto di vista della psicologia cognitiva – sono evidenti: le concezioni intuitive poggiano su “teorie”, ovvero sistemi coerenti ed integrati di credenze tacitamente interiorizzate che rappresentano il nostro naturale modo di concepire determinati fenomeni. Al modo di procedere della scienza si oppone quindi una forma di ragionamento spontaneo, per dirla con Viennot<sup>35</sup>, che non solo è quasi impossibile sradicare ma è molto difficile anche cercare di inibire.

Complementari agli studi di area cognitiva, i lavori sulla causalità fenomenica avviati da Albert Michotte il quale, adottando un approccio teorico-metodologico di tipo fenomenologico-sperimentale, indaga le correlazioni tra determinate condizioni stimolo e impressioni fenomeniche di diverso genere quali, ad esempio, “trascinamento” e “lancio”<sup>36</sup>. Sulla stessa linea si collocano anche i pionieristici contributi di Paolo Bozzi risalenti al quadriennio 1958-1961<sup>37</sup>, nei quali lo psicologo, attraverso la

---

<sup>34</sup> McCloskey e colleghi, ad esempio, interrogandosi sull’origine delle credenze ingenue sul moto, ritengono poco plausibile che queste scaturiscano per via induttiva da singole esperienze percettive. Richiamandosi a Piaget, gli studiosi sostengono piuttosto che i modelli soggettivi delle leggi del moto riflettono il sistema concettuale utilizzato dalle persone per inferire conclusioni dalla loro esperienza con oggetti in movimento. A questo proposito si veda, ad esempio, anche N. J. Nersessian, L. B. Resnick, «Comparing Historical and Intuitive Explanations of Motion: Does “Naive Physics” have a Structure?», *Proceedings of the Cognitive Science Society* 11, LEA, Hillsdale (NJ), 1989, pp. 412-420.

<sup>35</sup> L. Viennot, «Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire», *Revue française de pédagogie*, 45(1), 1978, pp. 16-24.

<sup>36</sup> A. Michotte (1946), *La percezione della casualità*, a cura di G. Petter, Giunti, Firenze, 1972.

<sup>37</sup> Per una panoramica sull’attività di Paolo Bozzi si veda P. Legrenzi, *Paolo Bozzi: una biografia intellettuale (ed il tema dei saperi ingenui)*. Relazione tenuta all’Accademia



progettazione di ingegnosi esperimenti sul moto pendolare, la caduta dei gravi e il moto dei proiettili, collega le credenze di fisica ingenua alle qualità espressive<sup>38</sup> dei movimenti cui assistiamo abitualmente, nonché al linguaggio ordinario che, cercando di esprimerle<sup>39</sup>, dà voce a salienze percettive intraducibili nel lessico scientifico. Aggettivi quali “lento”, “veloce” o “naturale” che nello scambio comunicativo quotidiano vengono correntemente utilizzati per qualificare più precisamente il moto dei corpi, non trovano, infatti, alcun corrispettivo nella descrizione del fenomeno fornita dalla fisica; per quanto, avvalendosi di un sistema di convenzioni matematiche, sia possibile in qualche modo costruire delle regole di proiezione che formalmente consentono il passaggio da un universo di discorso all’altro, rimane tuttavia inaccessibile il senso proprio di quelle espressioni linguistiche che può essere adeguatamente reso solo attraverso una «definizione ostensiva»<sup>40</sup>.

Intendendo dimostrare il fondamento percettivo della distinzione aristotelica tra moti naturali e moti violenti, Bozzi indaga sperimentalmente i requisiti che deve possedere il moto di un oggetto lungo un piano inclinato per determinare l’impressione di una discesa “naturale”<sup>41</sup>, le condizioni alle

---

Galileiana di SS.LL.AA. il 30 Gennaio 2007, disponibile all’indirizzo Internet: [https://www.researchgate.net/publication/242756677\\_Paolo\\_Bozzi\\_una\\_biografia\\_intellettuale\\_ed\\_il\\_tema\\_dei\\_saperi\\_ingenui](https://www.researchgate.net/publication/242756677_Paolo_Bozzi_una_biografia_intellettuale_ed_il_tema_dei_saperi_ingenui).

<sup>38</sup> Questo costruito, noto anche come qualità terziarie (P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., in particolare cap. 3), è stato indagato da vari autori da prospettive differenti. Per una panoramica generale si rinvia a G. Parovel, *Le qualità espressive: fenomenologia sperimentale e percezione visiva*, Mimesis, Milano, Udine, 2012.

<sup>39</sup> P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., p. 65.

<sup>40</sup> Scrive Bozzi: «Una stessa velocità, metricamente definita sulle coordinate di spazio e tempo, può essere veduta come lenta se l’oggetto in moto è grande, e può essere veduta come rapida se l’oggetto è molto più piccolo. La lentezza e la velocità dei moti che i corpi compiono nello spazio fenomenico, inoltre, non è ricavata per via logica, ma è direttamente data all’osservatore, esattamente come il colore e la forma dei corpi in questione: per accertarsene basta guardare per un poco il traffico da una finestra del terzo piano». Id., «Sulla preistoria della fisica ingenua», *Sistemi Intelligenti*, 1(1), 1989, pp. 61-74, p. 63.

<sup>41</sup> Con questo s’intende un movimento che non appaia a chi lo osserva né troppo rapido (come se fosse dovuto a una spinta) né troppo lento (come fosse frenato da un qualche attrito) in nessun punto del suo percorso. Id., «Le condizioni del movimento “naturale” lungo i piani inclinati», *Rivista di psicologia*, 53(2), 1959, pp. 337-352.

quali si verifica una «convincente realizzazione visiva di un proiettile lanciato da qualcosa verso qualcos'altro»<sup>42</sup>, ed infine le circostanze in cui le oscillazioni di un pendolo vengono valutate “giuste” (naturali), ovvero né accelerate né rallentate<sup>43</sup>.

Per quanto concerne quest'ultimo caso – sul quale ci soffermeremo brevemente in quanto paradigmatico della tesi bozziana secondo cui alcune credenze pregalileiane si collegano alle qualità dell'esperienza diretta nella percezione del moto<sup>44</sup> – lo psicologo, costruito un pendolo meccanico costituito da un rettangolo largo 2,5 cm e di lunghezza variabile (10, 20 o 40 cm, a seconda dei casi), lo faceva oscillare davanti a un campione di spettatori, variando di volta in volta le frequenze delle oscillazioni che erano comprese tra le diciassette e le novantacinque per minuto primo<sup>45</sup>. La prima constatazione dello psicologo fu che il periodo delle oscillazioni giudicate «fenomenicamente “naturali”»<sup>46</sup> non coincideva con quello delle oscillazioni «fisicamente “naturali”» ovvero col periodo derivabile mediante la legge di Galileo; in quanto «proprietà fenomenica del moto», l'andamento del pendolo «vissuto come “naturale”» risultava dipendere piuttosto da un insieme di «condizioni compresenti nel campo stesso

---

<sup>42</sup> P. Bozzi, «Sulla preistoria della fisica ingenua», cit., p. 72.

<sup>43</sup> A questo proposito Bozzi parla di «movimento fenomenicamente proprio». Id., «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», *Rivista di Psicologia*, 52(4), 1958, pp. 281-302, in particolare pp. 287-290.

<sup>44</sup> P. Legrenzi, «La fisica ed altri saperi ingenui», in U. Savardi e A. Mazzocco (a cura di), *Figura e Sfondo, Temi e variazioni per Paolo Bozzi*, Cleup, Padova, 2003, pp. 45-50.

<sup>45</sup> Per i dettagli dell'esperimento si rinvia a P. Bozzi, «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», cit.; Id., *Fisica ingenua*, cit., pp. 265-293.

<sup>46</sup> La frequenza fenomenica non dipende da una sola variabile come nel caso del moto pendolare fisico ( $T = f\sqrt{l}$ ), ma da più variabili quali, ad esempio, l'ampiezza dell'oscillazione, la lunghezza, la massa apparente, il baricentro apparente e così via. Per maggiori dettagli si veda A. Frick., S. Huber, U. D. Reips, H. Krist, «Task-Specific knowledge of the law of pendulum motion in children and adults», *Swiss Journal of Psychology*, 64 (2), 2005, pp. 103-114. Inoltre, sul piano fenomenico non vale, tra lunghezza e frequenza, lo stesso rapporto quantitativo che regola il movimento fisico: le frequenze sono rappresentate, infatti, da valori sempre più bassi quando aumenta la lunghezza del pendolo. Le frequenze fenomenicamente “proprie” sono sempre inferiori a quelle che un pendolo identico a quello osservato assumerebbe oscillando liberamente, sebbene questa differenza tenda a diminuire con l'aumentare della lunghezza del pendolo. P. Bozzi, «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», cit., p. 291.

dell'osservazione», quali la «forma dell'oggetto», l'essere percepito come «pesante o leggero» o il suo compiere «una maggiore o minore escursione da un estremo all'altro della traiettoria»<sup>47</sup>. Non solo. A riprova della radice percettiva delle espressioni di meraviglia proferite dallo scienziato pisano nel constatare l'isocronismo delle oscillazioni, Bozzi citava i commenti degli osservatori al variare dell'ampiezza dell'arco percorso dal pendolo, dai quali emergeva con chiarezza l'incidenza di tale parametro sul giudizio relativo alla sua frequenza “fenomenicamente propria”. Ne consegue, pertanto, che «dal punto di vista del moto oscillatorio fenomenicamente “giusto”»<sup>48</sup> – punto di vista condiviso sia dai soggetti sperimentali di Bozzi sia dai contemporanei di Galileo tra cui il matematico Guidobaldo del Monte<sup>49</sup> – la legge dell'isocronismo non vale.

Lumeggiando il problema dell'autonomia delle leggi strutturali di organizzazione della realtà fenomenica dall'azione di fattori estranei al sistema percettivo, quali, ad esempio, cognizioni fisico-matematiche o abitudini apprese in base alla passata esperienza, Bozzi attraverso i suoi esperimenti mostra inequivocabilmente che, per quanto la fisica moderna

---

<sup>47</sup> Id., *Fenomenologia del movimento e dinamica pregalileiana*, «Aut Aut», 64 (3), 1961, pp. 377-393, p. 386.

<sup>48</sup> L'esperimento conduceva, infatti, alla seguente constatazione: «quando l'ampiezza di oscillazione viene aumentata l'andamento fenomenicamente “naturale” di un pendolo si ha in corrispondenza di frequenze più basse». Ivi, p. 387.

<sup>49</sup> Scrive Bozzi: «Il fisico Guidobaldo del Monte, non convinto da una prima lettera di Galileo nella quale gli erano state comunicate le leggi del moto pendolare armonico, espresse al fisico pisano le sue perplessità; e Galileo rispose scusandosi della sua insistenza “in voler persuaderle vera la proposizione dei moti fatti in tempi uguali”, e aggiunse che “essendomi parsa sempre mirabile, ora vieppiù mi pare, che da V. S. Ill.ma vien reputata come impossibile”». (Lettera del novembre 1602, cit. in P. Bozzi, «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», cit., p. 284). E ancora: «Galileo aveva già osservato che i moti dei pendoli appaiono diversi a seconda che l'arco su cui oscillano è grande oppure piccolo. Giurerei che Guidobaldo del Monte, nelle sue osservazioni, aveva fatto andare un pendolo prima su grandi archi e poi piccolissimi “osservando” che il moto del corpo oscillante era diverso nei due casi, senza però fare un confronto diretto o una misurazione, come aveva fatto Galileo; e dunque aveva visto che “le vibrazioni” sono diverse». Id., *Fisica ingenua*, cit., p. 282.

abbia rivoluzionato il nostro modo di concettualizzare il mondo, noi tutti continuiamo a percepirlo come lo ha rappresentato Aristotele<sup>50</sup>.

Sebbene non intenzionalmente orientati a fini didattici, gli studi dello psicologo forniscono così un apporto prezioso alla comprensione e di riflesso alla gestione di alcune delle criticità rilevate sul piano dell'apprendimento della fisica, illuminandole attraverso un'analisi dei fatti percettivi che, fornendo una perspicua chiave di lettura della persistenza delle concezioni di fisica spontanea – perlomeno di alcune –, non può essere elusa da chi è chiamato ad amministrare il delicato rapporto tra saperi ingenui e saperi formali.

### *3. La risposta psicopedagogica: i teorici del cambiamento concettuale*

Dalla breve rassegna – certamente non esaustiva ma comunque rappresentativa di almeno alcuni esempi paradigmatici divenuti oramai dei classici all'interno del filone di studi sulla *naive physics* – emergono, dunque, espliciti riferimenti ai fondamenti cognitivi e percettivi della meccanica intuitiva del “fisico ingenuo” che, costituendo lo sfondo del suo agire irriflessivo, funge da lente deformante rispetto alle successive acquisizioni formali<sup>51</sup>. Di questo problema che, come denunciato da

---

<sup>50</sup> A proposito della distinzione aristotelica tra moti naturali e moti violenti, Bozzi sostiene che: « [...] Non è possibile dire, per esempio, che le strutture della realtà immediatamente percepita condizionano in modo rigido il nostro modo di pensare il mondo in termini di rapporti obiettivi. Le prime teorie scientifiche apparse nella storia dell'umanità dovrebbero allora essere altrettante fedeli descrizioni dell'esperienza fenomenica, mentre in effetti non lo sono. Ma è abbastanza importante sapere che, d'altra parte, non è possibile fare l'affermazione contraria: dire cioè che le concezioni scientifiche si sono sviluppate solo nella forma di sistemi logici, interferenti tra loro sul piano storico ma non influenzati dal modo con cui la realtà si presenta - spontaneamente e prima di ogni critica - davanti a noi. I casi che ho citato costituiscono già qualche punto d'appoggio per questa tesi, e non è improbabile che, cercando attentamente, se ne trovino altri». Id., «Fenomenologia del movimento e dinamica pregalileiana», cit., p. 392.

<sup>51</sup> A questo riguardo si rinvia inoltre a N. Grimellini Tomasini, G. Segrè, «Introduzione», in Id. (a cura di), *Conoscenze scientifiche: le rappresentazioni mentali degli studenti*, Firenze,

Gardner, compromette la possibilità di «imparare a pensare in modo disciplinare»<sup>52</sup>, si occupa anche un nutrito gruppo di studiosi – in particolare psicologi dell'età evolutiva ed esperti di didattica delle scienze – i quali rintracciano nel costrutto del “cambiamento concettuale”, formulato a partire da una concezione dell'apprendimento come attività costruttiva e intenzionale, un dispositivo teorico per interpretare il passaggio dalle iniziali concezioni intuitive alle concezioni scientificamente accreditate. Approfondito in maniera relativamente autonoma sia nel campo della psicologia dello sviluppo che in quello dell'educazione scientifica, l'approccio del cambiamento concettuale, in continuità con l'impostazione piagetiana, assume come *focus* di analisi le strutture mentali dei discenti, concependole, tuttavia, non come costituite da operazioni logiche bensì come reticoli di concetti e credenze interrelati<sup>53</sup>.

In ambito evolutivo, l'introduzione dell'espressione *conceptual change* è da ricondursi al tentativo della psicologa americana Susan Carey<sup>54</sup> di proporre un'alternativa capace di arginare i limiti – messi in luce a partire dalla seconda metà degli anni '70 – della concezione dominio-generale dello sviluppo difesa da Piaget, senza tuttavia ricadere nell'eccessiva frammentazione che caratterizza l'approccio dell'elaborazione dell'informazione. Diversamente dallo psicologo ginevrino, Carey pone l'accento più sui contenuti di pensiero che sulla sua forma, avanzando l'ipotesi che l'evoluzione cognitiva dei bambini consista nella sostituzione di teorie nuove a teorie preesistenti elaborate su circa una dozzina di

---

La Nuova Italia, 1991, pp. VII-VIII. Di questo era convinto anche Gaston Bachelard, il quale nel 1938 precorreva i tempi denunciando l'ingenuità dei professori di scienze colpevoli ai suoi occhi di non tenere in debito conto le conoscenze empiriche che costituiscono il bagaglio culturale degli alunni. Id., *La formazione dello spirito scientifico*, cit., p. 17.

<sup>52</sup> Ossia, come osserva Berta Martini, secondo quella specifica modalità che ciascuna disciplina ha di guardare il mondo. B. Martini, *La mente disciplinare ovvero il rapporto mente-saperi alla luce della prospettiva modularista*, cit.

<sup>53</sup> A. E. Berti, «Cambiamento concettuale e insegnamento», cit.

<sup>54</sup> S. Carey, *Conceptual change in childhood*, MIT Press, Cambridge (MA), 1985.

fenomeni del mondo<sup>55</sup>. Accantonata l'idea di operazioni intellettuali indipendenti dal contesto, la studiosa opta dunque per una visione dominio-specifica delle strutture cognitive così come dei loro cambiamenti, imputandoli a due differenti tipi di ristrutturazioni all'interno di un settore circoscritto.

Il primo tipo di ristrutturazione – identificata come debole – si manifesta con un incremento dell'interconnessione tra concetti e con il loro inserimento in schemi più complessi, da cui ha luogo la formazione di nozioni sovraordinate, capaci di inglobare quelli preesistenti e utili per fronteggiare nuove situazioni problematiche o per escogitare soluzioni più efficaci a problemi già incontrati. Il secondo tipo di ristrutturazione – definita radicale e paragonata dalla psicologa alla concezione kuhniana di “rivoluzione scientifica” – implica, invece, la profonda revisione delle strutture concettuali preesistenti, con conseguenti sensibili mutamenti per quanto concerne le relazioni che le legano e il dominio di fenomeni che spiegano: è proprio quest'ultimo tipo di ristrutturazione ad essere propriamente indicata dalla psicologa come cambiamento concettuale<sup>56</sup>.

Parallelamente alle ricerche nel campo della psicologia evolutiva, anche in ambito didattico-educativo si assiste, in quegli stessi anni, a un crescente interesse nei confronti delle rappresentazioni intuitive dei fenomeni naturali elaborate dai discenti<sup>57</sup>. A fronte dei numerosi insuccessi apprenditivi nelle discipline scientifiche, un gruppo di ricercatori dell'Università di Cornell<sup>58</sup>, insoddisfatti della visione empiristica della conoscenza, ma al contempo

---

<sup>55</sup> Sull'apporto della Carey alle teorie infantili sul mondo dei viventi si veda H. Gardner, *Educare al comprendere*, cit., pp. 100-102.

<sup>56</sup> L. Mason, *Psicologia dell'apprendimento e dell'istruzione*, cit., pp. 122-123. Un chiaro esempio di questo secondo tipo di ristrutturazione è ad esempio il passaggio dalla teoria dell'*impetus* alla nozione newtoniana di forza e di inerzia.

<sup>57</sup> K. A. Strike, G. J. Posner, «Conceptual change and science teaching», *European Journal of science education*, 4(3), 1982, pp. 231-240.

<sup>58</sup> G. J. Posner, K. A. Strike, P. W. Hewson, W. A. Gertzog, «Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change», *Science Education*, 66(2), 1982, pp. 211-227.

consci delle criticità dell'epistemologia piagetiana, si rivolge così alla filosofia e alla storia della scienza per trarre suggerimenti su come approntare interventi d'istruzione in grado di favorire la revisione delle concezioni ingenuie sulla realtà fisica: tali concezioni, infatti, rivelandosi sotto alcuni aspetti simili alle dottrine fisiche pregalileiane, legittimano, almeno parzialmente, l'ipotesi di un parallelismo tra scienziati e studenti<sup>59</sup>. All'interno di questa prospettiva viene evocata un'analogia tra i concetti piagetiani di "assimilazione" e "accomodamento" e i concetti di "scienza normale" e "rivoluzione scientifica" impiegati dall'epistemologo Thomas Kuhn per spiegare l'avvicendamento delle teorie nella storia della scienza<sup>60</sup>, con l'obiettivo di fornire indicazioni sui fattori che ostacolano la ristrutturazione delle proprie conoscenze informali e sulle azioni didattiche che possono invece promuoverla.

Basandosi sul duplice assunto della natura non cumulativa del sapere scientifico e delle misconcezioni come insiemi di credenze sistematicamente interconnesse, il modello proposto da Posner e colleghi – divenuto ormai un "classico" della ricerca in questo campo – stabilisce quattro condizioni fondamentali sottostanti alla revisione di conoscenze<sup>61</sup>. In primo luogo, sostengono gli studiosi, occorre suscitare nell'allievo una certa insoddisfazione nei confronti della concezione da modificare, generando una sorta di conflitto cognitivo. In secondo luogo, è necessario fare in modo che la nuova concezione risulti intelligibile per il discente che deve poterne comprendere le implicazioni. La terza condizione concerne invece la plausibilità della nuova teoria, ovvero il suo essere in armonia con una più vasta "ecologia mentale" di cui fanno parte, ad esempio, ipotesi e concetti

---

<sup>59</sup> A questo riguardo si veda anche S. Vosniadou, «Conceptual change research: An Introduction», in S. Vosniadou (a cura di), *International handbook of research on conceptual change*, Routledge, New York and London, 2008, pp. XIII-XXVIII.

<sup>60</sup> T. S. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi, 1999.

<sup>61</sup> G. J. Posner, K. A. Strike, P. W. Hewson, W. A. Gertzog, *Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change*, cit., pp. 213-214; L. Mason, *Psicologia dell'apprendimento e dell'istruzione*, cit., pp. 131-132.

metafisici, conoscenze attinenti ad altri ambiti della realtà, peculiari analogie e metafore, ideali esplicativi connessi a convinzioni sul metodo scientifico nonché idee generali sulla natura della conoscenza<sup>62</sup>. In ultimo, la nuova concezione deve apparire vantaggiosa, utile cioè ad affrontare problemi irrisolti e dotata di un maggiore potere esplicativo e predittivo.

Assunto per anni come esempio paradigmatico di didattica costruttivista in ambito scientifico, il modello di cambiamento concettuale inizialmente prospettato da Posner e colleghi non si è tuttavia rivelato immune da critiche<sup>63</sup>. In particolare, l'ipotesi che il cambiamento concettuale sia un tipo di apprendimento per *insight*, e il conseguente impiego del conflitto concettuale<sup>64</sup> come strategia didattica per favorire una ristrutturazione immediata e improvvisa del campo cognitivo, si è rivelata priva di fondamento empirico. A questo proposito basti rammentare la distinzione tra “discente scolastico” ed “esperto disciplinare”, avanzata da Gardner sulla base di una ricca messe di risultati provenienti dalla ricerca psicopedagogica e didattica, da cui si evince chiaramente come troppo spesso la nuova conoscenza appresa a scuola rimanga “inerte”, incapace cioè di connettersi alla vita reale, non essendo prontamente disponibile all'applicazione o al trasferimento a nuove situazioni<sup>65</sup>.

---

<sup>62</sup> G. J. Posner, K. A. Strike, P. W. Hewson, W. A. Gertzog, *Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change*, cit., pp. 214-215; A. E. Berti, «Cambiamento concettuale e insegnamento», cit., p.23.

<sup>63</sup> S. Vosniadou, *Conceptual change research: State of the art and future directions*, in W. Schnotz, S. Vosniadou, M. Carretero (a cura di), *New perspectives on conceptual change*, Pergamon, Amsterdam, 1999, pp. 3-13, p. 4; S. Vosniadou, «Conceptual change research: An Introduction», in S. Vosniadou (a cura di), *International handbook of research on conceptual change*, Routledge, New York and London, 2008, pp. XIII-XXVIII, p. XV.

<sup>64</sup> La strategia didattica del conflitto cognitivo, muovendo dall'assunzione che la presentazione di dati anomali faciliterebbe la ristrutturazione delle conoscenze degli studenti, richiede che gli stessi vengano posti di fronte a delle prove evidenti in contraddizione con le concezioni da essi possedute. L. Mason, *Psicologia dell'apprendimento e dell'istruzione*, cit., p. 130.

<sup>65</sup> H. Gardner, *Educare al comprendere*, cit., pp. 160-161; S. Vosniadou, «Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning», in G. M. Sinatra, P. R. Pintrich (a cura di), *Intentional conceptual change*, LEA, London, 2003, pp. 377-406, in particolare pp. 394-403.



Di qui il proliferare di modelli alternativi: oltre alle revisioni apportate al modello classico da Posner e Strike<sup>66</sup>, centrate in particolare su un approfondimento del costrutto di “ecologia mentale”, segnaliamo tra le proposte più accreditate la posizione difesa da Andrea diSessa all’interno del filone di orientamento educativo e il contributo della psicologa Stella Vosniadou in ambito evolutivo. A differenza dei teorici del modello classico, diSessa<sup>67</sup> argomenta a favore della natura frammentaria delle misconcezioni degli studenti, individuando alla base della fisica ingenua collezioni non strutturate di elementi intuitivi derivati per astrazione da comuni esperienze quotidiane. Tale alternativa concettualizzazione del problema si riflette in un diverso obiettivo da perseguire sul piano didattico: non più la ristrutturazione di “teorie” originatesi spontaneamente, bensì la riorganizzazione e articolazione di questi pezzi di conoscenza – definiti primitivi fenomenologici<sup>68</sup> (*phenomenological primitives*) – in strutture più complesse e la loro connessione con concetti riferiti a entità e processi non osservabili che spetta alla scuola trasmettere.

Su posizioni differenti si attesta invece Vosniadou: a partire da ricerche sistematiche condotte nel dominio dell’astronomia elementare e della meccanica, la studiosa ipotizza che la conoscenza intuitiva si articoli in

---

<sup>66</sup> K. A. Strike, G. J. Posner, «A Revisionist Theory of Conceptual Change», in R. A. Duschl, R. J. Hamilton (a cura di), *Philosophy of Science, Cognitive Psychology, and Educational Theory in Practice*, State University of New York Press, Albany (NY), 1992, pp. 147-176, in particolare p. 149;

<sup>67</sup> A. diSessa, «Knowledge in pieces», in G. Forman, P. Pufall (a cura di), *Constructivism in the Computer Age*, LEA, Hillsdale (NJ), 1988, pp. 49-70.

<sup>68</sup> Scrive diSessa: «My alternative view is that intuitive physics consists of a rather large number of fragments rather than one or even any small number of integrated structures one might call “theories”. Many of these fragments, which I call “p-prims” (short for phenomenological primitives), can be understood as simple abstractions from common experiences that are taken as relatively primitive in the sense that they generally need no explanation; they simply happen. For example, why is it that you get more result when you expend more effort, say, pushing a big rock? There is no ready explanation, nor really any need for one. One has so much experience with things that work like that, that the phenomenon is encoded simply as an expected event. There is need for further explanation only when things *fail* to work in that way». Id., «Knowledge in pieces», cit., pp. 53-54.

modelli mentali, teorie specifiche e teorie cornice<sup>69</sup>. I primi, generati dal soggetto per risolvere problemi, spiegare e/o prevedere fenomeni del mondo naturale, sono basati su teorie specifiche costituite da informazioni concernenti le proprietà ed il comportamento di oggetti fisici, derivate dall'osservazione o trasmesse culturalmente. A loro volta, tali teorie specifiche sono vincolate a teorie cornice (*framework theories*) caratterizzate da presupposizioni ontologiche ed epistemologiche circa le entità esistenti e la natura della conoscenza, presupposizioni che rappresentano lo sfondo di certezze su cui poggia il ragionamento quotidiano.

Entrando nel merito di alcune ricerche condotte insieme a Brewer<sup>70</sup> sullo sviluppo della conoscenza cosmologica dei bambini, Vosniadou spiega, infatti, come i loro primi modelli intuitivi della Terra – in aperto contrasto con il concetto scientifico di sfera rotante in rivoluzione attorno al Sole – derivino plausibilmente dall'interpretazione dell'esperienza pratico-percettiva del mondo nel quadro di due teorie cornice. La prima assume la forma di un'ontologia costruita grazie ad apprendimenti informali accumulati fin dai primi mesi di vita e descrive varie caratteristiche degli oggetti, tra cui quella di cadere se privati di sostegno. La seconda, invece, riguarda la dimensione epistemologica della conoscenza e si fonda sul presupposto che le cose sono così come si vedono. Questi due tipi di presupposizioni influenzano l'interpretazione di ciò che il bambino

---

<sup>69</sup> S. Vosniadou, «Capturing and modeling the process of conceptual change», *Learning and instruction*, 4(1), 1994, pp. 45-69; S. Vosniadou, «The Framework Theory Approach to the Problem of Conceptual Change», in S. Vosniadou (a cura di), *International handbook of research on conceptual change*, cit., pp. 3-34; S. Vosniadou, I. Skopeliti «Conceptual Change from the Framework Theory Side of the Fence», *Science and Education*, 23(7), 2014, pp. 1427-1445.

<sup>70</sup> S. Vosniadou, W. F. Brewer, «Mental models of the Earth: a study of conceptual change in childhood», *Cognitive Psychology*, 24(4), 1992, pp. 535-586; S. Vosniadou, W. F. Brewer, «Mental models of the day/night cycle», *Cognitive Science*, 18(1), 1994, pp. 123-183.

percepisce e conducono ad un modello intuitivo, secondo cui la terra è piatta e sotto di essa c'è terreno.

All'interno del quadro esplicativo proposto dai due psicologi<sup>71</sup>, il sorgere di misconcezioni si lega così alla formulazione di modelli sintetici riconducibili al tentativo, da parte dei discenti, di incorporare nelle teorie cornice preesistenti le nuove conoscenze – in questo caso le informazioni verbali e/o iconiche sulla sfericità della terra – veicolate a scuola. La complessità del cambiamento concettuale – inteso qui come l'esito di un lento e complesso processo socio-cognitivo di ristrutturazione della teoria cornice iniziale – è quindi da imputare, secondo la psicologa, proprio alla difficoltà di modificare assunzioni ontologiche ed epistemologiche talmente radicate da rappresentare il sistema di certezze comunemente condiviso su cui si basano gli scambi comunicativi quotidiani.

Una differente ma altrettanto plausibile spiegazione della pervicacia della fisica ingenua proviene dall'interpretazione del cambiamento concettuale avanzata da Michelene Chi e colleghi<sup>72</sup>. Sulla base delle rivoluzioni concettuali discusse da storici e filosofi della scienza nonché della nutrita letteratura sulle concezioni ingenuie presenti a diversi livelli scolari, gli studiosi propongono, come causa delle misconcezioni nel dominio della fisica, l'attribuzione dei concetti a categorie ontologiche errate. Identificate tre categorie basilari della realtà – sostanze materiali, processi e stati mentali – caratterizzate a loro volta da sottocategorie definite da specifici attributi, il modello proposto da Chi e colleghi distingue tra un cambiamento

---

<sup>71</sup> Antecedenti al pieno sviluppo del modello scientifico di Terra come sfera rotante in rivoluzione attorno al Sole che si attesta nella fascia d'età 8-10 anni, Vosniadou e Brewer rilevano tra i modelli iniziali posseduti dai bambini la Terra rettangolare (*Rectangular Earth*) e la Terra a disco (*Disc Earth*), mentre tra i modelli sintetici, frutto di un compromesso tra modelli intuitivi e il modello scientifico veicolato dall'istruzione scolastica, la Terra doppia (*Dual Earth*), la sfera cava (*Hollow Sphere*) e la sfera appiattita (*Flattened Sphere*). Id., «Mental models of the Earth: a study of conceptual change in childhood», cit., in particolare p. 549 e pp. 578-580.

<sup>72</sup> M. T. H. Chi, J. D. Slotta, N. de Leeuw, «From things to processes: a theory of conceptual change for learning science concepts», *Learning and Instruction*, 4(1), 1994, pp. 27-43.

concettuale *all'interno* di una stessa categoria ontologica e uno *attraverso* categorie differenti: proprio quest'ultimo, più impegnativo da attuare, è quello richiesto per il passaggio dalla fisica ingenua alla fisica esperta. La «comprensione autentica», per dirla con Gardner, è infatti subordinata, alla capacità di riassegnare un concetto ad una categoria ontologica diversa da quella in cui era stato inizialmente collocato, capacità che implica, come nel caso precedente, un profondo mutamento del sostrato originario di presupposti ontologici ed epistemologici.

Una conferma in questo senso deriva anche dagli studi di Chinn e Brewer<sup>73</sup> sulle reazioni ai dati anomali ovvero a informazioni che confliggono con le proprie conoscenze pregresse su un dato argomento. Anche in questo caso le credenze di ordine ontologico ed epistemologico<sup>74</sup> vengono considerate un vero e proprio ostacolo alla costruzione di nuove conoscenze, comparando tra i fattori citati dagli studiosi quali potenziali responsabili della resistenza al cambiamento, di mutamenti solo superficiali e, al limite, del totale rifiuto di abbandonare le proprie convinzioni originarie.

In merito a quest'ultimo punto che concerne il tipo di trasformazione suggerito dall'espressione “cambiamento concettuale”, sono tuttavia necessarie alcune precisazioni. Non tutti gli studiosi concordano, infatti, con un'accezione di cambiamento che sottende il completo abbandono di tutte le concezioni in contrasto con quelle scientificamente accreditate. Vosniadou, *in primis*, ritiene che il discrimine tra esperti e novizi si giochi sul piano della consapevolezza metaconcettuale e della flessibilità cognitiva che favoriscono la capacità di assumere prospettive e punti di vista di volta in volta adeguati ai diversi contesti: gli esperti, infatti, non abbandonano le

---

<sup>73</sup> C. A. Chinn, W. F. Brewer, «The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implication for science instruction», *Review of Educational Research*, 63(1), 1993, pp. 1-49.

<sup>74</sup> Gli altri fattori presi in considerazione sono rispettivamente le caratteristiche delle preconoscenze dell'individuo, della nuova teoria, dei dati anomali stessi e delle strategie di elaborazione adottate per comprendere il nuovo materiale concettuale. L. Mason, *Verità e certezze. Natura e sviluppo delle epistemologie ingenua*, Carocci, Roma, 2013, p. 137.

teorie di senso comune ma, contrariamente agli studenti, sono in grado di differenziarle metacognitivamente dalle teorie scientifiche<sup>75</sup>. Negli scambi comunicativi ordinari – rileva Berti<sup>76</sup> a questo proposito – anche gli scienziati sono soliti utilizzare espressioni quali, ad esempio, “il sole sorge” e il “sole tramonta”, espressioni che ben riflettono la quotidiana esperienza di una terra immobile circondata da astri in movimento<sup>77</sup>. Non avrebbe alcun senso, sottolinea la psicologa, contestare l’utilizzo di tali espressioni in quanto improprie o errate sulla base dei progressi della moderna astronomia: la reciproca autonomia e complementarità tra conoscenze scientifiche e concezioni di senso comune deriva, infatti, dal loro rispondere ad esigenze di diverso tipo<sup>78</sup>.

Del medesimo avviso alcuni studiosi, tra cui Caravita e Halldén<sup>79</sup>, i quali, al di là delle differenze specifiche, condividono un’interpretazione del cambiamento concettuale come ampliamento del repertorio di modi alternativi di rappresentazione della realtà, funzionali a diversi contesti. In opposizione al modello classico, anche Pozo<sup>80</sup> e Spada<sup>81</sup> sostengono che il

---

<sup>75</sup> S. Vosniadou, «Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning», cit., in particolare pp. 402-403.

<sup>76</sup> A. E. Berti, «Cambiamento concettuale e insegnamento», cit., p. 25.

<sup>77</sup> A questo proposito scrive Bozzi: «Gli antichi cedettero che la Terra su cui poggiamo i piedi sta ben ferma, mentre gli astri si muovono rispetto a essa: questa è già fisica ingenua fondata sulla percezione. In effetti, il nostro apparato percettivo non dispone di alcun indice del moto terrestre, mentre la vista rileva il lento moto degli astri relativo a qualche sistema di riferimento ancorato al terreno. Ciò basta a dire con verità: “Gli astri si muovono, la Terra no”. Si tratta di una proposizione scientificamente vera entro l’orizzonte delle constatazioni dirette e ripetibili». P. Bozzi, *Fisica ingenua*, cit., p. 30.

<sup>78</sup> Scrive Berti: «La conoscenza della moderna astronomia, più che soppiantare le concezioni di senso comune, ad esse si aggiunge, e viene usata in altri contesti come, ad esempio, per spiegare il ciclo delle stagioni». Id., «Cambiamento concettuale e insegnamento», cit.

<sup>79</sup> S. Caravita, O. Halldén, «Re-framing the problem of conceptual change», *Learning and Instruction*, 4(1), 1994, pp. 89-111.

<sup>80</sup> J. I. Pozo, M. A. Gomez, A. Sanza, «When change does not mean replacement: different representations for different contexts», in W. Schnotz, S. Vosniadou, M. Carretero (a cura di), *New perspectives on conceptual change*, Pergamon, Amsterdam, 1999, pp. 161-175.

<sup>81</sup> H. Spada, «Conceptual change or multiple representations?», *Learning and instruction*, 4(1), 1994, pp. 113-116. «Many so-called naive concepts and problem solution strategies are very helpful in almost all situations of daily life. Scientific reasoning is not in the position to replace commonsense thinking. Both types do complement each other. The

costituirsi di una *forma mentis* scientifica non richiede necessariamente la rimozione di qualsiasi forma di sapere ingenuo – spesso utile in situazioni di vita quotidiana – bensì la consapevolezza dei differenti interrogativi e scopi che animano la scienza nonché del suo peculiare modo di descrivere e concettualizzare la realtà naturale. Con il mutare del quadro teorico di riferimento muta, pertanto, anche l’obiettivo a cui mira l’educazione scientifica: dalla dicotomia vero/falso, espressione di un’epistemologia ingenua<sup>82</sup>, l’accento si sposta così sulla possibilità di gestire «rappresentazioni multiple» (*multiple representations*) in modo efficace e consapevole<sup>83</sup>.

Tale sofisticato cambiamento di prospettiva – più vicino al nostro sentire in quanto preliminare e necessario a una definizione di competenza disciplinare come capacità di servirsi di quella specifica disciplina quale strumento di indagine e di interpretazione della realtà<sup>84</sup> – trova adeguata collocazione anche all’interno della cornice concettuale didattico-disciplinare che offre, a nostro avviso, una nuova e fertile angolazione da cui guardare il problema.

---

student has to learn to discriminate in which situations which concepts and problem solution strategies are adequate. As a consequence a new instructional goal could be formulated, the goal to promote contextual multiple mental representations. The student should learn to see the limitations of each representation and to use them successfully in the appropriate contexts». Ivi, p. 115.

<sup>82</sup> Con il costrutto “epistemologie personali” si intende l’insieme di convinzioni che, influenzando il modo personale in cui gli studenti si rapportano ad uno specifico sapere, possono, a seconda dei casi, favorire oppure ostacolare l’apprendimento significativo dei suoi contenuti. L. Mason, *Verità e certezze*, cit., in particolare cap. 7 e 8.

<sup>83</sup> S. Vosniadou, «Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning», cit., pp. 402-403.

<sup>84</sup> Sul costrutto di “competenza disciplinare”, intesa come inclusiva sia della competenza *nella* disciplina sia della competenza *della* disciplina, si rinvia a B. Martini, *Formare ai saperi*, FrancoAngeli, Milano, 2005, pp. 75-76.

#### 4. *La risposta didattico-disciplinare: la teoria della trasposizione didattica e il costrutto di ostacolo epistemologico*

Preso coscienza dell'ampia messe di problemi annidati nel rapporto tra fisica intuitiva e fisica esperta, intendiamo ora inquadrare questo tema all'interno della prospettiva didattico-disciplinare<sup>85</sup> che, restituendo centralità al sapere, ne mette in luce l'intrinseco potere formativo offrendo strumenti concettuali idonei a contemperare tanto le istanze dell'oggetto quanto quelle del soggetto, in linea con un'opzione teorica di matrice problematicista. A questo scopo riorienteremo l'attenzione dalle strutture mentali dei discenti al carattere sistemico della relazione di insegnamento-apprendimento, collocando il fenomeno in questione all'interno del sistema didattico costituito dalla triade insegnante-allievo-sapere<sup>86</sup>, che rappresenta i tre differenti punti di vista da cui può essere analizzato il processo di trasmissione di conoscenze.

L'analisi dello sviluppo della conoscenza del soggetto perseguita dagli studi di psicologia cognitiva ed evolutiva, certamente fondamentali ma non esaustivi rispetto alla complessità della problematica didattico-educativa, verrà quindi sostituita o meglio contestualizzata e ricompresa all'interno dell'indagine sulle condizioni di funzionamento della relazione di

---

<sup>85</sup> Sul paradigma didattico-disciplinare si rinvia a B. Martini, «La didattica disciplinare», in M. Baldacci, E. Colicchi (a cura di), *Teoria e prassi in pedagogia. Questioni epistemologiche*, Carocci, 2016.

<sup>86</sup> B. Martini, *Didattiche disciplinari*, cit., pp. 23-39. Scrive a questo proposito Berta Martini: «Tale schema, già presente nei lavori di Chevallard (Id., M. A. Joshua, «Une example d'analyse de la transposition didactique», *Reserches en Didactique des Mathématiques*, 3(1), 1982, pp. 159-239) allude al complesso sistema di relazioni che si instaurano reciprocamente tra i diversi "attori" durante l'azione didattica, definendone ad un tempo la specificità e la problematicità». Ivi, p. 24. Martini sottolinea inoltre come la struttura a triangolo consenta non solo di porre in evidenza il processo di trasmissione di conoscenze (il sapere) da un emittente (l'insegnante) a un ricevente (l'allievo), ma anche di porre il problema delle condizioni e delle eventuali disfunzioni di tale trasmissione. Questo aspetto in particolare verrà approfondito nel terzo capitolo, in riferimento alla specifica problematica discussa in questo lavoro.

insegnamento-apprendimento che qui, nello specifico, si traduce nella ricerca delle condizioni alla base di una trasposizione didattica epistemologicamente e pedagogicamente fondata.

Con “trasposizione didattica”, termine coniato nel 1985 dal disciplinarista francese della matematica Yves Chevallard, s’intende «il lavoro che di un oggetto del sapere da insegnare fa un oggetto di insegnamento»<sup>87</sup>, ovvero quel «processo creativo e complesso», scrive Martha Isabel Fandiño Pinilla, «che vede protagonista l’insegnante che agisce sul Sapere per trasformarlo in un sapere da insegnare adatto all’allievo»<sup>88</sup>. Sorta originariamente come risposta ai lavori di matrice psicopedagogica caratterizzati da un forte *focus* sul soggetto, la nozione di trasposizione didattica concerne la possibilità di stabilire relazioni opportune tra sapere esperto (*savoir savant*), sapere da insegnare (*savoir à enseigner*) e sapere insegnato (*savoir enseigné*), alludendo metaforicamente – scrive Berta Martini<sup>89</sup> – al «situare altrove», ovvero ad uno «spostamento non rettilineo», in conseguenza del quale il sapere «cambia» alcune caratteristiche o, appunto, la sua «forma».

Tale costrutto, riconosciuto oggi come uno degli strumenti concettuali più fertili delle Didattiche disciplinari, si configura così come il tentativo di emancipare la ricerca didattica dal paradigma applicazionista<sup>90</sup>, il quale, assoggettando l’insegnamento esclusivamente alle teorie dell’apprendimento, finisce per destituire il sapere del suo potere formativo.

---

<sup>87</sup> Y. Chevallard, *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*, La Pensée Sauvage, Grenoble, 1985, p. 39, cit. in S. Nirchi, «The historical development of the Didactic Transposition concept in curricular project of disciplinary knowledges», *Q-Times Webmagazine*, VI (4), 2014, pp. 1-10, [http://qtimes.it/flv/Nirchi\\_Qtimes\\_VI\\_4\\_14.pdf](http://qtimes.it/flv/Nirchi_Qtimes_VI_4_14.pdf), p. 4.

<sup>88</sup> M. I. Fandiño Pinilla, «Trasposizione, ostacoli epistemologici e didattici: quel che imparano gli allievi dipende da noi. Il caso emblematico di frazioni, area e perimetro», in S. Sbaragli (a cura di), *La matematica e la sua didattica, vent’anni di impegno*. Atti del Convegno Internazionale omonimo, Castel San Piretro Terme (BO), 23 settembre 2006, Pitagora, Bologna, 2006, pp. 117-120, p. 117.

<sup>89</sup> B. Martini, *Formare ai saperi*, cit., pp. 64-65.

<sup>90</sup> Sull’inadeguatezza dell’approccio applicazionista in didattica, secondo il quale l’insegnamento è causa dell’apprendimento, si rinvia anche a E. Damiano, *La mediazione didattica: per una teoria dell’insegnamento*, Franco Angeli, Milano, 2013, pp. 107-138.



Recuperare questo polo del sistema didattico apre così alla possibilità di ripensare il problema del rapporto tra fisica ingenua e fisica esperta alla luce del ruolo fondamentale che, all'interno del processo di insegnamento-apprendimento, gioca la distinzione tra forme scientifiche e forme didattiche dei saperi unitamente all'indagine delle loro reciproche relazioni. Interrogarsi continuamente in merito al lavoro di adattamento e di trasformazione del sapere esperto in oggetto di insegnamento (del *savoir savant* in *savoir à enseigner*) in funzione del luogo, degli scopi e dei destinatari della trasmissione<sup>91</sup> è, infatti, sempre anche un modo per riflettere sulla natura, sull'evoluzione nonché sull'intrinseco potenziale formativo della disciplina, al fine di renderla disponibile come specifica «forma di cultura», come «prospettiva conoscitiva per comprendere e interpretare la realtà»<sup>92</sup>.

La realizzazione di un simile progetto di educazione scientifica che risponde alla sfida della complessità<sup>93</sup> reclama, tuttavia, l'esplicitazione delle difficoltà che “coagulano” intorno alla definizione dei vincoli epistemologici e pedagogici a cui un'adeguata ed efficace trasposizione didattica deve rispondere, difficoltà a cui, a nostro avviso, è possibile ed opportuno guardare attraverso il costrutto didattico-disciplinare di ostacolo epistemologico. A questo fine riteniamo necessario offrirne una parziale rilettura<sup>94</sup> volta ad integrare le posizioni eterogenee ma complementari dei due studiosi che se ne sono principalmente occupati – rispettivamente

---

<sup>91</sup> B. Martini, *Didattiche disciplinari*, cit., p. 42.

<sup>92</sup> B. Martini, S. Sbaragli, *Insegnare e apprendere la matematica*, Tecnodid, Napoli, 2005, p. 25.

<sup>93</sup> Per un approfondimento sulla sfida della complessità in ambito educativo si rinvia a E. Morin, *La testa ben fatta. Riforma dell'insegnamento e riforma del pensiero*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 2000.

<sup>94</sup> La centralità del costrutto di ostacolo epistemologico per la comprensione della relazione tra fisica ingenua e fisica esperta è stata discussa in M. Tombolato, «Il costrutto di ostacolo epistemologico per un'interpretazione in chiave didattica del rapporto fra conoscenza ingenua e conoscenza formale in fisica», *Pedagogia più didattica. Teorie e pratiche educative*, 2(1), aprile 2016, da cui è in parte tratto quanto segue.

Gaston Bachelard<sup>95</sup> e Guy Brousseau<sup>96</sup> – riarticolandole alla luce del carattere relazionale del processo conoscitivo. In altri termini, per potersi rivelare un dispositivo ermeneutico ed euristico paradigmatico dei fenomeni d'insegnamento-apprendimento interpretati in un'ottica sistemica, la nozione di ostacolo epistemologico deve conciliare l'epistemologia descrittiva di ascendenza bachelardiana, centrata sui fattori storici e psicologici che condizionano l'evoluzione del pensiero scientifico, con la funzione normativa del sapere a cui rinvia Brousseau nello spostare l'attenzione dai limiti psichici del soggetto conoscente allo statuto epistemologico dei concetti e alla loro intrinseca complessità<sup>97</sup>.

Riferito, infatti, alle difficoltà intrinseche al processo conoscitivo inteso come correlazione intenzionale soggetto-oggetto piuttosto che a uno solo di questi due poli pensati in opposizione dicotomica, tale costrutto si presta ad un duplice sguardo, alludendo da un lato alle difficoltà *oggettive* generate dalla complessità dei contenuti conoscitivi, dall'altro alle manifestazioni *soggettive* di tali difficoltà oggettive che si annunciano attraverso una vasta fenomenologia di misconcezioni rilevabili descrittivamente dalla ricerca empirica. Con questo, tuttavia, non si intende sostenere l'esistenza di un nesso di tipo deterministico-causale tra misconcezioni degli studenti e ostacoli interni al sapere, bensì solamente ipotizzare un nesso correlazionale, soggetto a validazione empirica, senza che ciò implichi necessariamente una corrispondenza biunivoca misconcezione–ostacolo:

---

<sup>95</sup> G. Bachelard, *La formazione dello spirito scientifico*, cit. Per l'epistemologo francese l'ostacolo risiede nel pensiero, nella limitatezza della mente umana che, intrisa di pregiudizi, si attarda nella conoscenza di senso comune opponendo resistenza all'avanzare dei nuovi modi di vedere.

<sup>96</sup> G. Brousseau, «Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques», *Recherches en didactique des mathématiques*, 4(3), 1983, pp. 165-198. Per Brousseau l'ostacolo si lega alla natura intrinseca del sapere, all'impossibilità di comunicarlo immediatamente nella sua generalità, ampiezza e complessità.

<sup>97</sup> Tra gli esempi di ostacoli proposti da D'Amore ritroviamo il postulato di Archimede e il concetto di numero immaginario. B. D'Amore, M. I. Fandino Pinilla, I. Marazzani, S. Sbaragli, *La didattica e le difficoltà in matematica*, Erickson, Gardolo (TN), 2008, pp. 46-47.

uno stesso ostacolo può, infatti, essere posto in relazione con un'ampia fenomenologia di misconcezioni, così come una stessa misconcezione può rinviare all'intreccio di più ostacoli.

In sintesi possiamo dunque concludere che, sul piano didattico, la fertilità di tale dispositivo interpretativo si lega a doppio filo al suo porre in relazione aspetti soggettivo-descrittivi e oggettivo-normativi della conoscenza, facendo convergere verso un unico obiettivo – garantire le condizioni di possibilità dell'apprendimento – contributi provenienti da ambiti distinti. Non solo. La duplice prospettiva da cui possiamo interpellarlo ne amplifica la potenza euristica: se è possibile, a partire dalle misconcezioni rilevate dalla ricerca empirica, risalire ai diversi ostacoli connaturati ad una specifica disciplina, è sempre anche possibile percorrere la strada in senso inverso grazie allo studio della storia e dell'epistemologia della disciplina stessa. Sullo sfondo di questa premessa si colloca il nostro tentativo di utilizzare in senso euristico le misconcezioni poste in evidenza da tre studi empirici – selezionati a titolo di casi paradigmatici – e confermate in larga misura dai risultati di un'indagine esplorativa condotta su un campione di studenti iscritti al corso di laurea in Scienze della Formazione Primaria, per intercettare, all'interno del dominio della meccanica classica, gli ostacoli che storicamente si sono frapposti alla costituzione di tale specifico sapere.

### *5. Dalle misconcezioni agli ostacoli: mondo newtoniano vs mondo reale.*

La ricerca di Efraim Fischbein, Ruth Stavy e Hana Ma-Naim<sup>98</sup> analizza, attraverso questionari e colloqui, le interpretazioni ingenue delle nozioni di forza e movimento di un campione formato da 45 studenti di 15 anni (X

---

<sup>98</sup> E. Fischbein, R. Stavy, H. Ma-Naim, «La struttura psicologica dell'idea ingenua di impulso», in B. D'Amore, G. Vergnaud (a cura di), *Matematica a scuola: teorie ed esperienze*, 6, 1992, pp. 39-50.

grado) privi di una conoscenza sistematica della meccanica, e da 44 studenti di 16 anni (XI grado)<sup>99</sup> che invece avevano ricevuto un'istruzione a riguardo. I questionari somministrati intendevano determinare l'influenza della forma e del peso degli oggetti sulle risposte degli studenti in merito al moto degli stessi dopo aver perso il contatto con il fattore agente, in condizioni di assenza di attrito. Gli scopi che guidavano i ricercatori erano i seguenti: verificare l'ipotesi, già avanzata da altri studiosi tra cui McCloskey, che le persone generalmente interpretano il moto libero di un oggetto non come l'effetto dell'inerzia bensì di una forza impressa; confermare l'influenza dell'esperienza pratica su tale convinzione attraverso la dimostrazione che le previsioni dei soggetti sul perdurare del moto di un oggetto dopo il distacco dal fattore agente dipende da alcune sue peculiare caratteristiche quali la forma e il peso, anche in assenza di attrito; analizzare la natura psicologica della teoria ingenua dell'impeto; verificare gli effetti dell'istruzione sulla modificazione delle concezioni ingenuie alla luce del fatto che, come dimostrano diversi studi, queste spesso permangono anche dopo interi cicli d'istruzione<sup>100</sup>; verificare la congettura che, secondo i soggetti ingenui, solo gli oggetti lanciati e non quelli trasportati acquisiscono l'impulso dal mezzo agente. Le situazioni proposte includevano oggetti (di differente forma, peso e funzione) trainati e sganciati da un aeroplano, lanciati lungo un precipizio, trascinati e successivamente rilasciati da un'auto, lanciati da una molla su una superficie liscia. Le interviste vertevano sui medesimi quesiti dei due questionari, con l'obiettivo di acquisire informazioni più dettagliate sulle motivazioni addotte dagli studenti circa il perdurare del moto dei vari oggetti una volta separati dal mezzo .

---

<sup>99</sup> Entrambi i gruppi di studenti erano divisi in 4 classi e frequentavano scuole dell'area urbana di Tel Aviv.

<sup>100</sup> Ad esempio, J. Clement, «Students' preconceptions in introductory mechanics», *The American Journal of Physics*, 50(1), 1982, pp. 66-71; A. Caramazza, M. McCloskey, B. Green, «Naive beliefs in "sophisticated" subjects: Misconceptions about trajectories of objects», cit.; M. McCloskey, «Fisica intuitiva», cit.

I risultati mostrano inequivocabilmente come la differente forma e/o peso degli oggetti condizioni le risposte dei soggetti esaminati riguardo la persistenza del moto – sebbene esclusivamente quelle degli studenti privi di conoscenze di fisica –, nonostante la specifica clausola dell'assenza di attriti. Ad esempio, il 70% sostiene che un aliante continua il suo moto dopo essere stato sganciato da un aereo<sup>101</sup> (condizione di moto passivo), mentre la percentuale cala al 40% nel caso di una scatola, una palla o una ruota e si abbassa ulteriormente (29,5%) se l'oggetto è una cassa piena. Per quanto concerne invece gli oggetti lanciati dalla molla e trascinati dall'auto, la maggior parte delle risposte converge sulla palla, la quale viene ritenuta muoversi indefinitamente grazie all'impulso acquisito rotolando su una qualsiasi superficie di supporto. Nel problema del precipizio è sempre la palla l'oggetto ritenuto muoversi più a lungo sebbene non all'infinito a causa della forza di gravità che ne provoca la caduta nel precipizio.

Per quanto riguarda, invece, la distinzione tra il moto passivo degli oggetti trasportati e quello attivo degli oggetti lanciati, i risultati evidenziano come in quest'ultimo caso i soggetti – ancora una volta quasi esclusivamente quelli del X grado – siano maggiormente inclini ad interpretare il moto come effetto di un impeto interno che ne rappresenta la causa. Ad esempio, paragonando il problema dell'aeroplano che trasporta un corpo (moto passivo) e quello della discesa-precipizio (moto attivo), la maggior parte degli studenti privi di nozioni di meccanica opta per la continuazione del moto in misura maggiore per il secondo esempio (circa 70%-80%) rispetto al primo (30%-40%). Un discorso analogo vale per il problema dell'auto posto a confronto con quello della molla.

---

<sup>101</sup> Nel problema dell'aereo gli oggetti proposti sono una scatola, una cassa, una palla, una ruota e un aliante. Nell'esempio della molla gli oggetti sono una scatola e una palla, mentre in quello dell'auto abbiamo una cassa, una ruota e ancora una palla. Per quanto concerne il problema del precipizio abbiamo di nuovo una scatola e una palla. Si confrontino le tavole 1-4 in E. Fischbein, R. Stavy, H. Ma-Naim, «La struttura psicologica dell'idea ingenua di impulso», cit., pp. 49-50.

Di qui le considerazioni avanzate dall'equipe di ricercatori: per quanto concerne i "discenti intuitivi" (X grado), in base alle risposte fornite pare lecito concludere che gli errori commessi siano dovuti al loro confondere la «rappresentazione empirica [del moto] con quella ideale basata sulla logica»<sup>102</sup>. Sembra, pertanto, pienamente confermata l'ipotesi di una meccanica ingenua derivata prevalentemente dall'interazione con l'ambiente quotidiano. D'altronde, anche molti degli studenti dell'XI grado, pur avendo fornito risposte tendenzialmente corrette, non riescono a motivare adeguatamente e in maniera convincente le loro scelte durante i colloqui. L'insegnamento sembra così essersi limitato a rafforzare negli studenti certe prestazioni "meccaniche", senza tuttavia riuscire ad intaccare la radice intuitiva delle loro convinzioni profonde.

Fischbein conclude pertanto che, a differenza di quanto ottimisticamente preconizzato da Piaget e Inhelder<sup>103</sup>, il principio di inerzia non si acquisisce spontaneamente durante lo stadio formale operatorio, ma va guadagnato attraverso un prolungato *training* intellettuale, essendo il risultato di un «esperimento mentale ideale» governato da leggi puramente logiche. La chiave di accesso ai principi della fisica, sottolinea lo psicologo, è quindi la capacità di condurre «esperimenti mentali ideali», capacità che nondimeno risulta fortemente ostacolata e compromessa dalle «abitudini empiriche del comportamento mentale degli studenti»<sup>104</sup>.

Ad illuminare da un'angolazione differente il medesimo problema uno studio<sup>105</sup> effettuato da Crystal D. Oberle, Michael K. McBeath, Sean C.

---

<sup>102</sup> E. Fischbein, R. Stavy e H. Ma-Naim, «La struttura psicologica dell'idea ingenua di impulso», cit., p. 45.

<sup>103</sup> J. Piaget, B. Inhelder, *Dalla logica del fanciullo alla logica dell'adolescente*, Giunti-Barbera, Firenze, 1984.

<sup>104</sup> E. Fischbein, R. Stavy e H. Ma-Naim, «La struttura psicologica dell'idea ingenua di impulso», cit., p. 48.

<sup>105</sup> C. D. Oberle, M. K. McBeath, S. C. Madigan, T. G. Sugar, «The Galileo Bias: A Naive Conceptual Belief That Influences People's Perceptions and Performance in a Ball-Dropping Task», *Journal of Experimental Psychology, Learning, Memory, and Cognition*, 31(4), 2005, pp. 643-653.

Madigan e Thomas G. Sugar dell'Arizona State University in cui viene presentata una nuova misconcezione denominata, non a caso, l'errore di Galileo (*the Galileo bias*)<sup>106</sup>. Stando a quanto sostengono i ricercatori, molto diffusa, soprattutto nei soggetti con un'istruzione formale nell'ambito della fisica, è infatti la credenza ingenua che in condizioni ambientali normali, ovvero non controllate sperimentalmente, tutti gli oggetti cadono sempre e comunque alla stessa velocità. L'indagine, attuata da Oberle e colleghi allo scopo di colmare una lacuna della letteratura scientifica sulla fisica ingenua, si struttura in tre prove che, in modo differente, consentono di sondare le conoscenze delle persone circa gli effetti perturbativi della resistenza dell'aria sugli oggetti, al variare di massa e volume.

La prima, di tipo teorico, prevedeva la somministrazione di un questionario formato da sei domande a scelta multipla, tre inerenti al comportamento di due palle dello stesso peso ma di dimensioni differenti, tre concernenti due palle di uguali dimensioni ma di diverso peso, a un campione di 105 studenti dell'Arizona State University, 63 di sesso femminile e 42 di sesso maschile, di età compresa tra 18 e 43 anni. Tra i partecipanti – inconsapevoli circa l'ipotesi specifica oggetto di indagine – 38 non avevano seguito alcun corso di fisica, 41 ne avevano frequentato almeno uno durante il liceo ma nessuno all'università, mentre 26 potevano vantare almeno un corso a livello universitario. Delle sei domande proposte, quattro miravano a rilevare esclusivamente le conoscenze teoriche<sup>107</sup> degli effetti esercitati sul moto dei corpi rispettivamente dalla resistenza dell'aria e dalla forza di gravità; le altre due, invece, richiedevano una mobilitazione di tali

---

<sup>106</sup> Ci si riferisce all'erronea previsione di Galileo circa l'esperimento delle due palle di peso diverso lasciate cadere dalla Torre di Pisa. A questo proposito si rinvia a G. Feinberg, «Falls of Bodies Near the Earth», *American Journal of Physics*, 33(6), 1965, pp. 501-502.

<sup>107</sup> Le domande proposte erano le seguenti: «Of a small ball and a large ball (that weigh the same), which ball is the most affected by gravity/air resistance?»; «Of a light ball and a heavy ball (that are the same size), which ball is the most affected by gravity/air resistance?». C. D. Oberle, M. K. McBeath, S. C. Madigan, T. G. Sugar, «The Galileo Bias: A Naive Conceptual Belief That Influences People's Perceptions and Performance in a Ball-Dropping Task», cit., p. 653.

conoscenze al fine di risolvere specifiche situazioni problematiche<sup>108</sup>. A seguire, due esperimenti nei quali a un totale di 98 studenti – più o meno equamente ripartiti tra i due esperimenti – veniva chiesto di lasciare cadere da un'altezza di 10 m delle coppie di sfere differenti per volume e massa nel primo caso, e per volume o massa nel secondo, in modo tale che entrambe le palle potessero colpire il suolo contemporaneamente.

Dai risultati delle tre prove si evince chiaramente come molti dei soggetti coinvolti rivelino una conoscenza *naïve* del moto dei corpi in presenza di un mezzo resistente, soprattutto per quanto concerne gli specifici fattori che lo influenzano. I partecipanti, in particolare quelli con una maggiore conoscenza disciplinare, tendono, infatti, a sottostimare gli effetti del mezzo resistente se non addirittura ad ignorarli completamente, fornendo risposte in accordo con le equazioni galileiane, senza tenere in debito conto che queste si riferiscono a casi idealizzati, a cui le situazioni reali possono approssimarsi solo sotto determinate condizioni. Ne consegue come tra le possibili cause all'origine di tale misconcezione possa essere considerata anche un certo tipo d'istruzione scientifica la quale, basandosi prevalentemente su modelli ideali, induce gli studenti ad ignorare l'azione di possibili fattori perturbativi con l'inevitabile conseguenza di un'incapacità, da parte dei soggetti istruiti, di stimarne correttamente le conseguenze ove necessario.

Simili considerazioni, già di per sé meritevoli di un'accurata riflessione sul piano didattico, acquistano, a nostro avviso, una pertinenza ancora maggiore rispetto al problema che intendiamo indagare se poste a confronto con le conclusioni avanzate da Fischbein, confronto che ci consente di formulare una prima osservazione: se da un lato le «abitudine empiriche del

---

<sup>108</sup> «If a small ball and a large ball (that weigh the same) are dropped from the top of the psychology building, which ball will hit the ground first?»; «If a light ball and a heavy ball (that are the same size) are dropped from the top of the psychology building, which ball will hit the ground first?». *Ibidem*.



comportamento mentale»<sup>109</sup> delle persone condizionano negativamente la capacità di ragionare in termini puramente logici, ostacolando la formulazione di espressioni mentali ideali indispensabili al progresso scientifico, dall'altro un insegnamento di stampo prevalentemente "razionalista", che sacrifica alla semplicità matematica delle equazioni il confronto con la realtà empirica, incide altrettanto negativamente sul proficuo utilizzo di questi strumenti concettuali nella descrizione e interpretazione dei fenomeni naturali.

Sotto questo profilo, un contributo significativo proviene dalla ricerca condotta da Horst P. Schecker<sup>110</sup> volta ad indagare le implicazioni, sul piano dell'apprendimento, tra il cambiamento concettuale richiesto dall'acquisizione dei concetti della fisica classica e il cambio di paradigma sotteso al passaggio dalla fisica aristotelica a quella galileiana. Inserendosi anch'egli in quel novero di studiosi che riconosce una sorta di parallelismo tra misconcezioni degli studenti e concezioni pregalileiane, Schecker si concentra, tuttavia, non su specifici preconcetti – come l'interpretazione del moto come *impetus* – bensì su caratteristiche più generali, avanzando l'ipotesi che molte concettualizzazioni alternative di nozioni scientifiche derivino da cornici concettuali sottostanti (*frameworks of thinking*).

Alla base delle considerazioni di Schecker vi è uno studio dettagliato della "matrice di comprensione" (*matrix of understanding*) degli studenti nell'ambito della meccanica. Il costrutto di "matrice di comprensione" (MOU)<sup>111</sup> – elaborato dal gruppo di ricerca composto da Hans Niedderer,

---

<sup>109</sup> E. Fischbein, R. Stavy, H. Ma-Naim, «La struttura psicologica dell'idea ingenua di impulso», cit., p. 48.

<sup>110</sup> H. P. Schecker, «The paradigmatic change in mechanics: Implications of historical processes for physics education», *Science and Education* 1 (1), 1992, pp. 71-76.

<sup>111</sup> H. Niedderer, T. Bethge, H. Meyling, H. P. Schecker, «Epistemological beliefs of students in high school physics». Paper presented at the National Association of Research in Science Teaching Annual Meeting in Boston (1992), disponibile all'indirizzo Internet: <http://didaktik.physik.uni-bremen.de/niedderer/download/261992na.pdf>; H. Niedderer, «Science Philosophy, Science History and the Teaching of Physics», in S. Hills (a cura di),

Thomas Bethge, Heinz Meyling e dallo stesso Schecker (Institute for Physics Education, University of Bremen, Germany) sullo sfondo di una visione costruttivista dell'apprendimento ispirata dai principi della *new philosophy of science*<sup>112</sup> – comprende tutte le disposizioni (*dispositions*) che influenzano il modo in cui una persona concepisce e interpreta un fenomeno o un problema, condizionando osservazioni e descrizioni e suggerendo impressioni e spiegazioni provvisorie. Sulla base della matrice di comprensione – che tra le sue principali componenti include cornici concettuali generali, fattori affettivi e nozioni di fisica ingenua – le persone costruiscono significati relativamente a particolari situazioni concrete e iniziano, nel caso dell'apprendimento, il processo di cambiamento concettuale che generalmente conduce a una modificazione della struttura della MOU<sup>113</sup>.

Analizzando la matrice di comprensione di studenti della scuola superiore di età compresa fra i 16 e i 19 anni, l'autore identifica tre generiche cornici

---

*History and Philosophy of Science in Science Education*, 2, Ontario Queen's University, Kingston, pp. 201-214.

<sup>112</sup> G. Boniolo, P. Vidali, *Introduzione alla filosofia della scienza*, Mondadori, Milano, 2003, pp. 35-42.

<sup>113</sup> H. Niedderer, T. Bethge, H. Meyling, H. Schecker, «Epistemological beliefs of students in high school physics», cit., pp. 2-3. Scrivono in merito gli autori: «The concept "matrix of understanding" is related to other concepts like alternative frameworks, conceptual understanding, cognitive structures, conceptions and perceptions, etc. In our opinion it is important

- that the concept 'MOU' is applicable to every individual (including teachers), not only to students. This helps to see the teaching process as a complex process of understanding where teacher and student construct meaning for what they are seeing and hearing "from the other side" (from outside themselves) on the basis of their own MOU, [...]
- that the MOU is not a matter of right or wrong ("misconceptions"). Different persons can hold different alternative viewpoints having their positive meaning in a special class of situation contexts,
- that the MOU comprises not only cognitive structures but also the affective domain. In physics teaching this especially means that there are preferred directions for students' questions depending on the special area of content,
- that the MOU contains special elements of conceptual understanding (e.g. preconceptions about force, energy, electric current) and more general frames of thinking (e.g. concerning task of physics, the relation between theory and experiment).

concettuali, particolarmente esplicative e rappresentative del modo con cui i discenti recepiscono e interpretano l'insegnamento della fisica, che si possono ricapitolare come segue: gli studenti scambiano per reali e concrete le situazioni idealizzate ed astratte presentate nei libri di testo; ritengono che il compito principale della fisica sia la spiegazione di singole concrete esperienze; separano platonicamente i "mondi-laboratorio" ideali in cui valgono le leggi fisiche dal mondo reale nel quale, invece, tali leggi non trovano significativa applicazione. Quest'ultima convinzione, particolarmente radicata, rende molti studenti scettici di fronte all'analisi di casi di moto in assenza di attrito: incapaci di coglierne le implicazioni nella spiegazione della quotidiana esperienza, preferiscono concentrarsi su fenomeni direttamente accessibili all'occhio nudo<sup>114</sup>.

Ad ulteriore conferma di queste prime conclusioni, i risultati di un'indagine condotta su un campione di 254 studenti delle scuole superiori ai quali era stato chiesto di esprimere il proprio parere in merito al seguente quesito:

In physics lessons there are often assumptions or thought experiments, which can obviously not be realized in actual experiments, like completely excluding air resistance and other frictional effects or assuming an infinitely lasting linear motion.

Do you think this method is useful or not useful? Give reasons for your answer<sup>115</sup>.

Sebbene – commenta Schecker – solo uno studente su dieci giudichi il ricorso a casi ideali privo di senso opponendo, pertanto, un netto rifiuto al loro utilizzo, in realtà, dell'80% circa dei consensi, solo un terzo pare aver compreso adeguatamente la loro funzione nell'economia del progresso scientifico, ritenendoli degli strumenti concettuali indispensabili per rappresentare la realtà naturale.

---

<sup>114</sup> H. P. Schecker, «The paradigmatic change in mechanics: Implications of historical processes for physics education», cit., p. 72.

<sup>115</sup> Ivi, p. 74.

Conclusioni analoghe possono essere tratte sulla base del quadro emerso all'interno dei laboratori di Fisica rivolti agli studenti del corso di laurea in Scienze della Formazione Primaria, coordinati da chi scrive durante il secondo semestre dell'a.a. 2013-2014 e il primo semestre dell'a.a. 2014-2015.

A partire da alcune misconcezioni rilevate in un gruppo di 40 studenti sottoposti ai canonici quesiti di fisica ingenua sulla caduta dei gravi e sulla traiettoria dei corpi in movimento<sup>116</sup> menzionati nei paragrafi precedenti, è stata intavolata una discussione volta ad approfondire le motivazioni a sostegno delle risposte fornite, motivazioni che, nella maggior parte dei casi, alludevano al tentativo di visualizzare mentalmente le situazioni proposte. Particolarmente significativo, a questo proposito, quanto sostenuto da alcuni soggetti in merito al problema dell'aereo<sup>117</sup>: “la palla cade giù dritta perché nei film di guerra si vede benissimo che la bomba sganciata esplode in un punto a terra sotto l'aereo”; altri, individuando un'analogia con una situazione a loro più familiare, sostenevano al contrario: “la palla va all'indietro perché è ciò che succede quando in auto getti qualcosa fuori dal finestrino”.

Per quanto concerne invece la caduta dalla medesima altezza di gravi di diverso peso<sup>118</sup>, in molti evocavano qualche reminiscenza scolastica che chiedevano di poter mettere alla prova attraverso l'attuazione di esperienze concrete, nonostante l'esplicito e ripetuto invito a trascurare attriti e resistenza dell'aria: “perché almeno così possiamo vedere cosa succede”. A

---

<sup>116</sup> Ci si riferisce agli esempi – e alle relative immagini – riportati in precedenza: il problema dei tubi ricurvi, quello dell'aereo e quello del precipizio.

<sup>117</sup> Si veda Fig. 2, p. 18.

<sup>118</sup> Quesito tratto da B. Shanon, *Aristotelianism, Newtonianism and the physics of the layman*, cit.: Se una palla di 4 Kg lasciata cadere da una certa altezza raggiunge il terreno in  $z$  secondi, quanto impiegherà a cadere dalla stessa altezza una palla di 2 Kg, supponendo nulla la resistenza dell'aria?

- $2Z$
- $Z$
- Fra  $Z$  e  $2Z$

tale richiesta, tuttavia, alcuni studenti avanzarono un'obiezione interessante ("il testo del problema non specifica l'altezza da cui cade la palla"), innescando involontariamente un dibattito sul ruolo dell'altezza di caduta nella discesa dei corpi, con il delinearsi delle seguenti posizioni: circa la metà dei soggetti riteneva l'altezza non determinante ai fini dell'esito dell'"esperimento"; dell'altra metà, un'esigua minoranza correttamente collegava l'indifferenza dell'altezza all'assenza di attriti e quindi al fatto che l'esempio si riferisse a una situazione ideale, mentre i restanti sostenevano l'impossibilità di condurre l'"esperimento" per insufficienza di informazioni, intuendo, pertanto, una qualche rilevanza di tale parametro in riferimento al fenomeno della caduta.

Sulla base delle risposte fornite dagli studenti e ancor più del tenore dei commenti emersi durante la correzione orale, abbiamo ipotizzato di poter correlare suddette misconcezioni al modo peculiare e nient'affatto "naturale" con cui la fisica si riferisce ai fatti dell'esperienza, riconoscendolo innanzitutto come un ostacolo intrinseco alla natura e all'evoluzione del sapere scientifico.

Riscontrata la pressoché generale incapacità di spiegare in astratto il ruolo dei modelli nell'attività scientifica nonché di fornire esempi pertinenti a riguardo, si è pensato di predisporre un questionario (inserito in appendice) dove tale problematica potesse trovare una contestualizzazione più precisa, ispirandoci a questo fine anche alle ricerche di Fischbein e Oberle. I quesiti miravano a rilevare la capacità, da parte degli studenti, di distinguere tra i casi ideali (assenza di attriti e resistenza del mezzo) a cui si riferiscono le leggi e i principi della meccanica classica e i casi empirici dove quelle stesse leggi e principi valgono solamente sotto certe specifiche condizioni, nonché di saper riconoscere quali fattori influenzano le deviazioni di fenomeni e processi reali rispetto alle loro versioni idealizzate.

Somministrato a studenti di un successivo laboratorio (a.a. 2014-2015), previo accertamento della conoscenza dichiarativa delle leggi e dei principi

fisici coinvolti (legge del pendolo, legge della caduta dei gravi, principio d'inerzia), il test ha prodotto risultati “incoraggianti” (con una media di 4 quesiti corretti su un totale di 11) rispetto alla sostenibilità dell'ipotesi. In particolare si segnala come le risposte ai quesiti evidenzino una mancata conoscenza dei fattori che influenzano la forza di attrito (spesso peraltro totalmente ignorata dagli studenti), lacuna che si è cercato di approfondire al momento della correzione orale, indagando ulteriormente le motivazioni addotte dagli studenti al fine di cercare di ricostruire la cornice concettuale sottostante le loro misconcezioni. Ne è emersa una profonda e radicata confusione tra realtà empirica e rappresentazione idealizzata, riconducibile, in larga misura, a una quasi totale mancanza di consapevolezza degli strumenti epistemici (teorie, modelli astratti, modelli materiali, esperimenti...) di cui si avvale la fisica nonché del ruolo che compete loro nell'indagine della realtà naturale. Nello specifico, il regolare ricorso a situazioni idealizzate a cui le situazioni reali possono essere equiparate solamente *ceteris paribus* –, clausole peraltro di cui solo un'esigua minoranza contemplava l'esistenza – non era compreso in maniera “autentica”, ma giustificato sulla base del fatto che “se i fisici si comportano così e ottengono risultati vuol dire che è giusto”, dove “ottenere risultati” significava perlopiù “scoprono come veramente stanno le cose”.

Questi risultati, per quanto privi di rilevanza statistica, se affiancati agli esiti delle ricerche discusse in quest'ultimo paragrafo e, più in generale, alla letteratura sulla fisica ingenua, guadagnano tuttavia in significatività per quanto concerne l'ipotesi di lavoro che anima il presente contributo, ovvero la questione epistemologica dei rapporti tra scienza ed esperienza quale ostacolo all'apprendimento formale della fisica. A nostro avviso, infatti, per quanto vari e complessi siano i motivi<sup>119</sup> per cui le concezioni intuitive degli studenti risultano spesso impermeabili all'istruzione scolare, almeno uno,

---

<sup>119</sup> Per una panoramica generale si rinvia a B. Smith, R. Casati, «Naive physics», *Philosophical Psychology*, 7 (2), 1994, pp. 227-247.

tuttavia, è di un'evidenza difficilmente questionabile: la realtà di cui si occupa la fisica scolastica appare affatto diversa da quella che quotidianamente cade sotto i nostri sensi. I piani inclinati senza attrito, i corpi perfettamente rigidi, i punti materiali inestesi ma dotati di massa, per non parlare delle leggi newtoniane del moto, hanno davvero ben poco in comune con la realtà percepita. Di qui la necessità di assumere la postura del *savoir savant*, ovvero di analizzare la fisica al fine di ricavarne le condizioni pedagogiche per il suo apprendimento, attraverso un'indagine epistemologica volta a metterne in luce il "peculiare" rapporto con i fatti dell'esperienza.





# *La Fisica come Savoir Savant: un'analisi epistemologica*

## *1. I modelli come mediatori tra teoria e realtà*

In fisica il ragionamento basato su modelli – *model based reasoning* – rappresenta una componente chiave della teorizzazione scientifica così come testimoniano l'impostazione e l'organizzazione dei manuali su cui si formano gli studiosi della disciplina. In qualità di mediatori tra teoria e realtà, essi si rivelano, infatti, degli strumenti epistemici di fondamentale importanza a cui anche la riflessione filosofica ha iniziato a prestare una crescente e rinnovata attenzione a partire dalla seconda metà del secolo scorso, attenzione concretizzatasi dapprima con la “visione semantica” (*semantic view*) ed in seguito con i suoi esiti più recenti raccolti sotto il titolo di “visione modellistica” (*model view*).

Caratteristico di questo approccio – tra i cui principali esponenti ricordiamo Ronald Giere, Paul Teller e Maurizio Suarez<sup>1</sup> – è l'esigenza di una maggiore aderenza all'effettiva realtà della pratica scientifica, che si traduce nella rinuncia ad una sofisticata ricostruzione logico-razionale delle teorie, in

---

<sup>1</sup> F. Amigoni, V. Schiaffonati, «A Multiagent Approach to Modelling Complex Phenomena», *Foundations of Science*, 13 (2), 2008, pp. 113-125.

favore di una descrizione più vicina all'immagine basata su modelli che ne hanno gli scienziati. A questo proposito passeremo brevemente in rassegna le due principali caratterizzazioni delle teorie scientifiche – quella sintattica (*standard view*) difesa dal neopositivismo e quella semantica tipica del postpositivismo – le quali, assumendo posizioni diametralmente opposte sul tipo di relazione sussistente tra teorie e modelli, forniscono uno scenario consono a far emergere l'elemento di novità che contraddistingue la *model view*.

Secondo la visione standard in voga fino all'inizio degli anni '50, una teoria scientifica è un sistema assiomatico espresso mediante la logica del primo ordine, dove gli assunti fondamentali non interpretati definiscono implicitamente un insieme di concetti primitivi teorici – quali ad esempio “elettrone” o “particella” – che non possono in alcun modo essere connessi in via diretta con qualche fenomeno osservabile<sup>2</sup>. Dagli assunti o postulati si derivano successivamente dei concetti definiti esplicitamente nei termini dei concetti primitivi – appunto “concetti definiti” – a loro volta connessi, attraverso un insieme di regole a “concetti empirici”. Le “regole di corrispondenza” assegnano pertanto il contenuto empirico al calcolo logico astratto che da solo non è sufficiente a definire una teoria scientifica in quanto non può fornirle alcuna specifica interpretazione empirica, benché naturalmente possa sempre essere studiato come un pezzo di matematica pura.

Del tutto differente è invece la prospettiva entro cui si muove il padre della visione semantica Patrick Suppes, secondo il quale il miglior modo per rappresentare la struttura delle teorie scientifiche, restituendone l'intrinseca complessità, è considerarle come determinate dalla classe delle loro

---

<sup>2</sup> Per ulteriori approfondimenti si rinvia a G. Boniolo, P. Vidali, *Introduzione alla filosofia della scienza*, cit., p. 3; V. Fano, *Comprendere la scienza: un'introduzione all'epistemologia delle scienze naturali*, Liguori, Napoli, 2005; D. Hestenes «Modeling Game in the Newtonian World», *American Journal of Physics*, 60 (8), 1992, pp. 732-748, in particolare p. 736.

realizzazioni, ossia i modelli, descritti come predicati insiemistici, in cui tali teorie sono valide<sup>3</sup>. Reinterpretato secondo questa angolatura, il ruolo degli assiomi non è più definire implicitamente i termini primitivi del sistema formale, bensì vincolare i possibili modelli della teoria che, a loro volta, sostituiscono le regole di corrispondenza nel fornire l'interpretazione per gli assiomi. In questo senso, Suppes pone la questione del rapporto tra teoria e modello – nonostante le diverse accezioni con cui tale termine viene impiegato nei differenti contesti scientifici<sup>4</sup> – sotto l'egida dell'originaria definizione proposta da Alfred Tarski, secondo la quale «una possibile realizzazione in cui tutti gli enunciati validi di una teoria T sono soddisfatti è chiamato un *modello* di T»<sup>5</sup>.

Nel celebre saggio *A Comparison of the meaning and Uses of Models in mathematics and the Empirical Sciences*<sup>6</sup> apparso per la prima volta nel 1960 quando ancora la teoria dei modelli era strettamente di pertinenza della logica, Suppes argomenta a favore della sostanziale equivalenza della concezione di modello nella matematica pura e nelle scienze empiriche, pur fornendone una caratterizzazione astratta e insiemistica che difficilmente può dare ragione del concetto di modello fisico comunemente inteso. Se infatti in senso logico-matematico il termine modello indica una struttura che soddisfa certi assiomi, il modello fisico, al contrario, coincide generalmente con una rappresentazione molto semplificata della realtà che ne considera solamente i fattori rilevanti, consentendone, ove possibile, una

---

<sup>3</sup> V. Schiaffonati, «Riflettere sui dettagli della scienza: Patrick Suppes e i modelli», *Epistemologia*, XXIX, 2006, pp. 239-266.

<sup>4</sup> Per una panoramica sulle diverse accezioni del termine modello si rinvia a F. Bonicalzi, «Il Concetto di Modello. Aspetti storici e questioni teoriche», *Emmeciquadro*, 10, 2000, disponibile all'indirizzo Internet: [www.ilsussidiario.net/News/emmeciquadro/Emmeciquadro-n-10/2000/12/14/SCIENZAINATTO-Il-Concetto-di-Modello-Aspetti-storici-e-questioni-tecniche/233852/](http://www.ilsussidiario.net/News/emmeciquadro/Emmeciquadro-n-10/2000/12/14/SCIENZAINATTO-Il-Concetto-di-Modello-Aspetti-storici-e-questioni-tecniche/233852/).

<sup>5</sup> A. Tarski, *Undecidable Theories*, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1953, cit. in V. Schiaffonati, «Riflettere sui dettagli della scienza: Patrick Suppes e i modelli», cit., p. 242.

<sup>6</sup> P. Suppes, «A comparison of the meaning and uses of models in mathematics and the empirical sciences», *Synthese*, 12(2-3), 1960, pp. 287-301.

determinazione quantitativa<sup>7</sup>. La mossa strategica compiuta da Suppes per colmare il divario tra le due accezioni risiede nel «comprendere come parti del modello insiemistico gli oggetti che generalmente si pensa costituiscano il modello fisico, in modo tale che il modello fisico sia un caso speciale del modello insiemistico»<sup>8</sup>. In altri termini, la soluzione offerta dal filosofo americano consiste nel ricondurre una teoria fisica ad un insieme di modelli fisici, che a loro volta risultano modelli logico-matematici di un dato gruppo di assiomi<sup>9</sup>. Se per i logici, infatti, i modelli consistono generalmente di entità astratte come numeri o punti e linee geometrici, nulla vieta – almeno in linea di principio – che tali entità possano essere oggetti fisici come ad esempio la Terra e la Luna<sup>10</sup>.

Ricapitolando, nella visione suppesiana di ascendenza tarskiana una teoria è un'entità linguistica costituita da un insieme di assiomi, mentre un modello è un'entità non linguistica – più precisamente una struttura insiemistica consistente in un insieme di oggetti unitamente alle proprietà, relazioni e funzioni definite su tale insieme – che fornisce un'interpretazione agli assiomi della teoria, assumendo così il compito che all'interno della *standard view* viene assolto dalle regole di corrispondenza.

Sulla scia della svolta semantica inaugurata da Suppes, anche Bas van Fraassen, erede e innovatore della tradizione empirista novecentesca, riconosce grande importanza alla funzione rappresentativa ed esplicativa dei modelli, come peraltro testimonia la sua personale posizione epistemologica

---

<sup>7</sup> V. Fano, *Comprendere la scienza*, cit., pp. 90-91. Sul ruolo dei modelli nella matematica e nelle scienze in genere si veda anche H. Freudenthal (a cura di), *The concept and the role of the model in mathematics and natural and social sciences: proceedings of the Colloquium sponsored by the Division of philosophy of sciences of the International union of history and philosophy of sciences* (Utrecht, January 1960), Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1961.

<sup>8</sup> V. Schiaffonati, «Riflettere sui dettagli della scienza: Patrick Suppes e i modelli», cit., p. 243.

<sup>9</sup> V. Fano, *Comprendere la scienza*, cit., p. 91.

<sup>10</sup> R. Giere, «Using Models to Represent Reality», in L. Magnani, N. J. Nersessian, P. Thagard (a cura di), *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, Kluwer/Plenum, New York, 1999, pp. 41-57, p. 42.

definita «empirismo costruttivo»<sup>11</sup>. Secondo il filosofo olandese, infatti, l'obiettivo precipuo dell'indagine scientifica consiste nel «salvare i fenomeni» sviluppando teorie «empiricamente adeguate», ovvero costruendo modelli<sup>12</sup> capaci di cogliere e descrivere tutti – almeno in senso regolativo – e soli – in senso normativo – i dati osservativi disponibili, evitando di cadere in speculazioni metafisiche.

Così si esprime van Fraassen:

Presentare una teoria equivale a specificare una famiglia di strutture, i suoi *modelli*; e in secondo luogo, a specificare certe parti di questi modelli (le *sottostrutture empiriche*) come candidati per la rappresentazione diretta dei fenomeni osservabili. Possiamo denominare *apparenze* quelle strutture che possono venire descritte nei resoconti di esperimenti e misurazioni: la teoria è empiricamente adeguata se ha qualche modello, tale che tutte le apparenze sono isomorfe alle sottostrutture empiriche di quel modello<sup>13</sup>.

Secondo questa nuova immagine della scienza sviluppata nel quadro di una critica al positivismo logico, una teoria volta a descrivere con precisione esclusivamente le parti osservabili<sup>14</sup> della realtà può quindi soddisfare il requisito di «adeguatezza empirica» richiesto da van Fraassen, se e solo se le strutture empiriche del mondo possono essere rappresentate in un modello della teoria, dove la relazione fra modello e sistema reale è un

---

<sup>11</sup> Tale posizione si trova esposta e argomentata in B. Van Fraassen, *L'immagine scientifica*, CLUEB, Bologna, 1985.

<sup>12</sup> Diversamente da Suppes, van Fraassen considera i modelli non come strutture insiemistiche ma come traiettorie nello spazio degli stati. V. Schiaffonati, «Riflettere sui dettagli della scienza: Patrick Suppes e i modelli», cit., p. 248: «In sostanza nulla di diverso rispetto alla nozione di modello proposta da Suppes; ciò che vi è di nuovo è il concetto di spazio degli stati: se pensiamo a un sistema consistente di entità fisiche che si sviluppano nel tempo, ognuna delle quali ha uno spazio di stati possibili, allora un modello può essere definito come una rappresentazione di una di queste possibilità».

<sup>13</sup> B. Van Fraassen, *L'immagine scientifica*, cit., p. 95.

<sup>14</sup> Sul significato di «osservabile» per van Fraassen si rinvia a Id., *L'immagine scientifica*, cit.; D. Manetti, S. Zipoli Caiani, «Intervista a Bas van Fraassen», *Pianeta Galileo 2009*, consultabile all'indirizzo Internet: [www.consiglio.regione.toscana.it:8085/news-ed-eventi/pianeta-galileo/atti/2009/18\\_manetti.pdf](http://www.consiglio.regione.toscana.it:8085/news-ed-eventi/pianeta-galileo/atti/2009/18_manetti.pdf)

isomorfismo<sup>15</sup>, vale a dire una relazione di tipo semantico che implica un'identità totale di struttura come già prospettato da Suppes. Di quest'ultimo punto è bene cogliere l'importanza poiché è proprio il rifiuto di descrivere la relazione di corrispondenza tra modelli e realtà in termini di isomorfismo a sancire la transizione dalla visione semantica alla visione modellistica<sup>16</sup> che, in continuità con la precedente, riconosce la centralità della nozione di modello per il ragionamento scientifico, ampliandone tuttavia l'orizzonte semantico.

In particolare, il filosofo della scienza Ronald Giere<sup>17</sup>, pur riconoscendo il ruolo di primo piano che la concezione dei modelli come orientati all'interpretazione dei sistemi formali si ritaglia negli studi di logica e fondamenti della matematica, giudica tale accezione poco consona a catturare la loro effettiva funzione nelle scienze empiriche. Abbandonata la prospettiva normativa della *visione standard* in favore di un approccio descrittivo alla prassi scientifica, Giere pone così l'accento sulla portata rappresentazionale dei modelli, ovvero sul loro fungere da peculiari strumenti di rappresentazione che istituiscono con la realtà relazioni di somiglianza secondo aspetti e gradi specificati. Per meglio cogliere il senso di questa definizione, inclusiva – nella sua generalità – di diversi tipi di

---

<sup>15</sup> Intuitivamente due strutture algebriche sono isomorfe se coincidono a meno della natura o dei nomi dei loro elementi. Più in particolare, se A e B sono due strutture algebriche, esse sono isomorfe se esiste tra i due insiemi una corrispondenza biunivoca che conserva le operazioni e le relazioni delle strutture; ad esempio se A e B sono due gruppi rispetto alle operazioni  $\circ$  e  $*$ , essi sono isomorfi se e solo se esiste una corrispondenza biunivoca  $f$  di dominio A e codominio B tale che, per ogni  $x, y, z$  in A, se  $x \circ y = z$ , allora  $f(x) * f(y) = f(z)$ . Si dice che sono isomorfi due modelli di una stessa teoria formale se sono isomorfe le strutture algebriche determinate nei rispettivi domini dalle due interpretazioni. D. Palladino, C. Palladino, *Breve dizionario di logica*, Carrocci, Roma, 2005, p. 60.

<sup>16</sup> Tra la *model view* e la *semantic view* non vi è, tuttavia, come nota Schiaffonati (Id., «Riflettere sui dettagli della scienza: Patrick Suppes e i modelli», cit.), uno stacco netto simile a quello sussistente tra quest'ultima e la *standard view*. Una prospettiva alternativa alla visione modellistica la quale interpreta le teorie come famiglie di modelli si può trovare in S. M. Downes, «The Importance of Models in Theorizing: A Deflationary Semantic View», in *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1, 1992, pp. 142-153.

<sup>17</sup> R. Giere, «Using Models to Represent Reality», cit.

modelli (da quelli fisici a quelli astratti e teorici), ci lasceremo guidare da alcuni esempi offerti dal filosofo i quali, oltre ad avere il pregio della chiarezza, ci eviteranno di incorrere in possibili fraintendimenti e confusioni dovuti alla polivalenza semantica della nozione sotto esame<sup>18</sup>.

## 2. *Modelli fisici vs modelli astratti*

Articolando la sua riflessione sulla funzione rappresentazionale che li accomuna – non esclusiva ma centrale per quanto concerne il loro impiego nelle scienze empiriche –, Giere introduce la bipartizione tra modelli fisici (materiali) e astratti avvalendosi di un esempio paradigmatico tratto dalla cartografia<sup>19</sup>. Una mappa è un oggetto materiale – non un'entità linguistica di cui si può asserire sensatamente la verità o falsità – progettato per fornire una rappresentazione planimetrica parziale di un territorio o di suoi singoli aspetti entro determinati limiti di accuratezza. Cosa rende una mappa un modello fisico di un particolare luogo? Secondo il filosofo esclusivamente il suo condividere con la regione mappata delle similarità – nello specifico delle similarità di tipo spaziale – che la rendono una rappresentazione efficace in relazione a determinati scopi. Sulla giustificazione dell'adozione della somiglianza come modalità di relazione fra modello e realtà ritorneremo in seguito, per ora quel che ci preme sottolineare è che tale nozione non è soggetta ad alcuna definizione univocamente valida, essendo la somiglianza intrinsecamente «contesto-dipendente»<sup>20</sup>. Ne consegue l'obbligo – sostiene Giere – di specificare, in ogni particolare contesto, cosa è giudicato simile a cosa, sotto quali aspetti e in quali gradi poiché esistono

---

<sup>18</sup> F. Bonicalzi, «Il Concetto di Modello. Aspetti storici e questioni teoriche», cit.; M. Hesse, *Models and analogies in science*, Sheed & Ward, London, New York, 1963, pp. 7-56.

<sup>19</sup> Si tratta della mappa della città di Pavia. R. Giere, «Using Models to Represent Reality», cit., p. 45.

<sup>20</sup> Ivi, p. 46.

molte possibili specificazioni, tutte strettamente dipendenti dai particolari interessi di chi opera la modellizzazione<sup>21</sup>.

Le mappe, pertanto, sono «interesse-relative» e lo sono necessariamente: basti pensare a quelle metropolitane, dove i luoghi vengono indicati solo in maniera schematica in quanto le informazioni da veicolare – l'ordine delle stazioni situate su una medesima linea percorsa in un senso o nell'altro e l'indicazione degli incroci tra due o più linee - sono principalmente di tipo topologico. Un discorso analogo vale per i diagrammi<sup>22</sup> e per i modelli in scala, dove le opzioni disponibili sono varie, dai modelli di case ai modelli del sistema solare, passando per il modello tridimensionale costruito da Jim Watson durante il processo di scoperta della struttura a doppia elica delle molecole di DNA. Anche in questo caso abbiamo un oggetto fisico utilizzato per rappresentare altri oggetti fisici e questa funzione rappresentazionale ha luogo in virtù delle similarità strutturali tra il modello in scala e le reali molecole reali di DNA<sup>23</sup>.

Di genere affatto diverso sono invece i modelli astratti come, ad esempio, la semplice relazione lineare tra le variabili  $x$  e  $y$  espressa dall'equazione

$$y = ax + b$$

---

<sup>21</sup> Su questo punto concorda anche van Fraassen. A proposito della relazione che lega il modello ai fenomeni il filosofo della scienza sostiene, infatti, quanto segue: «L'unico modo per descrivere questo rapporto è facendo riferimento alle pratiche d'impiego di coloro che utilizzano il modello. Prendiamo come esempio una mappa, un caso tipico di modello: la sua relazione con i fenomeni dipenderà sempre dai modi con cui viene impiegata. Poniamo che per puro caso una mappa dei monumenti di Firenze potesse andar bene anche come rappresentazione della posizione di alcune stelle all'interno di una galassia. Cosa rappresenterà quella mappa? Di cosa sarà il modello? Nient'altro che il suo impiego può determinarlo. Non credo si possa comprendere la natura delle rappresentazioni in modo diverso». D. Manetti, S. Zipoli Caiani, «Intervista a Bas van Fraassen», cit., p. 248.

<sup>22</sup> Il diagramma di un circuito elettrico, ad esempio, dove ad essere modellizzate non sono le posizioni spaziali bensì le connessioni. R. Giere, «Using Models to Represent Reality», cit., pp. 47-48.

<sup>23</sup> Ivi, p. 48.



L'equazione di per sé è un oggetto di tipo linguistico il quale rinvia a una sorta di oggetto ideale che non coincide con l'equazione medesima<sup>24</sup>, ponendosi al contrario, come l'identico polo di riferimento di una pluralità di possibili rappresentazioni linguistiche e/o materiali<sup>25</sup>. A partire da questo modello di "matematica pura" è poi possibile costruire un modello di "matematica applicata", attribuendo un preciso significato fisico all'equazione, ovvero rimpiazzando gli elementi matematici con modelli di oggetti e relazioni reali. Indicando con  $y$  la distanza da un'origine fissata, con  $x$  il tempo ( $t$ ) – stabilito un istante iniziale arbitrariamente scelto che potrebbe essere l'istante zero – con  $a$  la velocità ( $v$ ) di un punto materiale in movimento ed infine con  $b$  l'iniziale distanza dall'origine ( $d_0$ ) del punto in movimento – si può, ad esempio, rappresentare un'auto che si allontana in linea retta da un incrocio a velocità  $v$  partendo all'istante  $t=0$  da una certa distanza  $d_0$ .

Naturalmente questo modello estremamente semplificato non consente di ottenere previsioni realistiche sulle successive posizioni nel tempo di una vera automobile, obiettivo che richiede la costruzione di modelli più complessi e sofisticati. Di questo, in linea di massima, si occupa la modellistica matematica, «disciplina intersettoriale»<sup>26</sup>, come la definisce Alfio Quarteroni, le cui recenti origini risalgono agli inizi del Novecento. L'approccio modellistico – spiega Quarteroni – consiste nel rappresentare problemi sorti in differenti domini scientifici o in contesti di vita quotidiana mediante equazioni matematiche, nella successiva analisi di tali equazioni, nonché nell'individuazione di metodi di simulazione numerica idonei ad

---

<sup>24</sup> L'equazione può infatti essere scritta in un'altra forma, ad esempio  $y-ax-b=0$ , oppure utilizzando lettere differenti.

<sup>25</sup> Nello specifico, ad esempio, un possibile modello materiale è fornito da una rappresentazione grafica della relazione matematica.

<sup>26</sup> A. Quarteroni, «La modellistica matematica: una sintesi tra teoremi e mondo reale». Prolusione tenuta dall'autore in occasione dell'inaugurazione del 136° anno accademico presso il Politecnico di Milano (3 ottobre 1998), *Politecnico. Rivista del Politecnico di Milano*, 2, 1999, pp. 24-30, p. 26, disponibile all'indirizzo Internet: [http://www.rivistapolitecnico.polimi.it/rivista/politecnico\\_rivista\\_2.24.pdf](http://www.rivistapolitecnico.polimi.it/rivista/politecnico_rivista_2.24.pdf)

approssimarle, implementabili su calcolatore tramite opportuni algoritmi<sup>27</sup>. Un modello matematico è dunque una rappresentazione, idealizzata e formale, del frammento di realtà oggetto del problema che, a causa della sua complessità, richiede, almeno inizialmente, una lettura semplificata basata sulla selezione degli aspetti ritenuti centrali codificabili in linguaggio matematico. In questo senso, come sostiene Angelo Guerraggio, i modelli non sono una fotografia della realtà, ma piuttosto una sua «deformazione»: il loro obiettivo, infatti, non è «riprodurre fedelmente tutti i dettagli dell'oggetto della rappresentazione quanto catturare il “messaggio” qualificante, esasperando – come in una caricatura, quasi con il gusto del paradosso – gli aspetti salienti e trascurando invece quelli marginali»<sup>28</sup>. Avvalendoci dell'efficace metafora proposta da Guerraggio potremmo dunque rappresentare le varie fasi dell'attività modellistica come un percorso lungo i quattro lati di un quadrato (Fig.1).

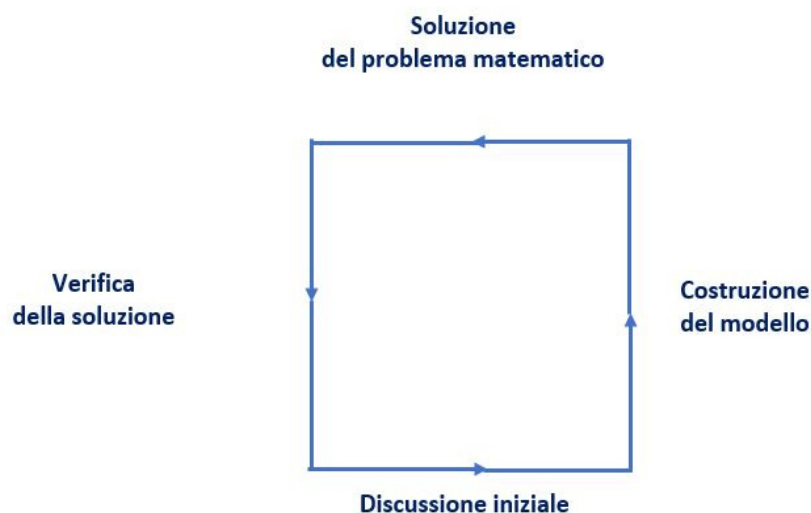
Il lato inferiore del quadrato esprime il problema da risolvere – il quesito a cui il modello dovrebbe fornire un'adeguata risposta – il quale, in genere, si presenta troppo complesso e polimorfo per poter essere trasposto in forma

---

<sup>27</sup> Ivi, p. 26.

<sup>28</sup> A. Guerraggio, *Il mestiere di matematico*, disponibile all'indirizzo Internet: <http://matematica-old.unibocconi.it/guerraggio/mestiere2.htm>. A questo proposito scrive Quarteroni: «Il passaggio dalla soluzione reale [del problema considerato] a quella fornita dal calcolatore si estrinseca attraverso diversi processi semplificativi, ognuno dei quali inevitabilmente introduce errori. Basti pensare che un modello matematico, per quanto complesso e raffinato sia, non potrà che basarsi su semplificazioni della realtà. Inoltre, essendo la soluzione esatta del problema matematico quasi mai conosciuta in forma chiusa, si dovrà ricorrere ad una discretizzazione del modello, ovvero ad una sua approssimazione in dimensione finita (ad esempio attraverso processi di proiezione su sottospazi, accompagnati da approssimazioni degli operatori differenziali e/o integrali che intervengono nel modello). Infine, lo stesso calcolatore, dovendo operare in aritmetica finita, introdurrà errori di rappresentazione ed ulteriori errori ogni qualvolta un'operazione algebrica viene effettuata. Uno degli obiettivi dei matematici è assicurare che tutti questi errori siano tenuti sotto controllo, in modo da garantire che la soluzione calcolata fornisca una rappresentazione sufficientemente accurata della soluzione del reale problema da cui si è partiti». Id., «Modelli matematici, calcolo scientifico e applicazioni», *Rendiconti del seminario matematico Università e Politecnico di Torino*, 66(3), 2008, pp. 173-183, disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.seminariomatematico.unito.it/rendiconti/66-3/173.pdf>.

matematica senza che vengano introdotte delle ipotesi semplificatrici (idealizzazioni).



**Fig. 1** La metafora del quadrato<sup>29</sup>

Il problema iniziale cede dunque il passo a un nuovo problema costruito sulla falsariga del primo, ma reso più maneggevole dalla riduzione del numero di variabili e delle loro reciproche relazioni. Proprio qui prende forma la «caricatura» della realtà, frutto della scelta del ricercatore che opera una prima distinzione tra aspetti essenziali e dettagli ininfluenti, senza tuttavia alcuna garanzia di successo: come sottolinea Guerraggio, infatti, vi sono molteplici modi di idealizzare un problema e di selezionarne i fattori rilevanti<sup>30</sup>. A questo proposito ci paiono particolarmente pertinenti le parole del matematico George Polya:

Risolvere problemi significa trovare una strada per uscire da una difficoltà, una strada per aggirare un ostacolo, per raggiungere uno scopo che non sia immediatamente raggiungibile. Risolvere problemi è un'impresa specifica

<sup>29</sup> Immagine tratta da A. Guerraggio, *Matematica*, Egea, Milano, 2012, p. 14.

<sup>30</sup> Ivi, p. 16.

dell'intelligenza e l'intelligenza è dono specifico del genere umano: si può considerare il risolvere problemi come l'attività più caratteristica del genere umano<sup>31</sup>.

La difficoltà maggiore nel processo di modellizzazione risiede quindi nel dover mobilitare conoscenze disciplinari specifiche per affrontare situazioni di *problem solving* in contesti reali che, essendo prive di una soluzione predefinita, non ammettono procedure univoche né durante la prima fase di semplificazione del problema né in quella successiva (corrispondente al lato verticale destro del quadrato) della sua traduzione in formule. In altre parole, la modellistica matematica è un'attività così complessa e impegnativa proprio perché non può risolversi deterministicamente in una rigida e meccanica applicazione di regole: nella costruzione di un modello, infatti, oltre alla natura del problema di partenza intervengono altri fattori decisivi quali la creatività, la competenza e l'*expertise* del ricercatore, unitamente alla possibilità di avvalersi di esempi simili che possano assolvere una funzione paradigmatica<sup>32</sup>.

Tornando alla nostra metafora, superate le prime due fasi del processo se ne apre una terza puramente formale che concerne lo sviluppo matematico del modello. In questa fase (corrispondente al tratto orizzontale superiore del quadrato) non è più presente alcun esplicito riferimento al concreto problema iniziale, ma ci si concentra unicamente sulla ricerca del «pezzo» di matematica utile allo scopo, sull'adattamento di teorie già elaborate o addirittura sull'invenzione di nuove; si passa infine al calcolo, in generale al calcolo numerico supportato da sofisticati programmi. In ultimo, l'iter si conclude con la verifica empirica della correttezza della soluzione trovata. Si percorre così in senso discendente il lato sinistro del quadrato e si ritorna

---

<sup>31</sup> G. Polya, *Come risolvere i problemi di matematica: logica ed euristica nel metodo matematico*, Feltrinelli, Milano, 1982, p. 11. Per ulteriori approfondimenti si rinvia a anche B. D'Amore, M. I. Fandiño Pinilla, «Che problema i problemi!», *L'insegnamento della matematica e delle scienze integrate*, 29(6), 2006, pp. 645-664.

<sup>32</sup> A. Guerraggio, *Matematica*, cit., p. 16.

al piano della realtà, dove ci si accerta che le semplificazioni e le approssimazioni introdotte nel modello non abbiano condotto a risultati inaccettabili dal punto di vista del problema di partenza; in tal caso si rende necessario un affinamento del modello iniziale o, nella peggiore delle ipotesi, una sua costruzione *ex novo*.

Sulla base di quanto sopra esposto, è pertanto ragionevole concludere con Giere<sup>33</sup> che modelli materiali e modelli astratti – sebbene differenti – possono assolvere la medesima funzione rappresentazionale in virtù della relazione di similarità selettiva (secondo aspetti e gradi specificati) che li lega ai sistemi reali rappresentati, relazione che finisce, tuttavia, per renderli inevitabilmente «interesse-relativi», vincolandoli agli obiettivi di chi li costruisce e di chi ne fruisce.

### *3. Modelli teorici: dai modelli di principi ai modelli rappresentazionali*

Focalizzando l'attenzione sull'attività di modellizzazione matematica possiamo ora cercare di tracciare una distinzione tra modelli meramente astratti di tipo fenomenologico o simulativo e modelli teorici sviluppati a partire da principi generali. Quando operata in assenza di tali principi, la modellizzazione di fenomeni naturali mette capo unicamente a modelli descrittivi che formalizzano regolarità rilevabili su base osservativa e/o sperimentale, stabilendo correlazioni tra grandezze misurabili e consentendo di effettuare previsioni limitatamente a fenomeni simili<sup>34</sup>. Un esempio a riguardo ci è fornito dalle leggi di Keplero che permettono di prevedere con

---

<sup>33</sup> R. Giere, «Representing with physical models», in P. Humphreys, C. Imbert (a cura di), *Models, Simulations, and Representations*, Routledge, New York, 2012, pp. 209-215.

<sup>34</sup> G. Israel, M. Iannelli, «Modellistica matematica», *Enciclopedia Italiana Treccani*, [http://www.treccani.it/enciclopedia/modellistica-matematica\\_\(Enciclopedia-Italiana\)](http://www.treccani.it/enciclopedia/modellistica-matematica_(Enciclopedia-Italiana)).

buona approssimazione le posizioni future dei pianeti del sistema solare, senza però riuscire a spiegare le traiettorie dei loro moti<sup>35</sup>.

Di altro genere sono invece i modelli teorici<sup>36</sup> – ad esempio l'oscillatore armonico semplice o un sistema gravitazionale a due corpi – collocati da Giere nella metà superiore di una struttura gerarchica<sup>37</sup> che fornisce una particolare chiave interpretativa della relazione tra teorie, modelli e realtà, riflettendo al contempo la complessità dell'attività scientifica e il suo articolarsi su due livelli distinti: un livello astratto-costruttivo in cui si sviluppano matematicamente tali modelli, e un livello empirico-sperimentale che prevede la loro validazione attraverso il confronto con i modelli dei dati<sup>38</sup>. Assumendo lo schema formulato dal filosofo (Fig. 2)

---

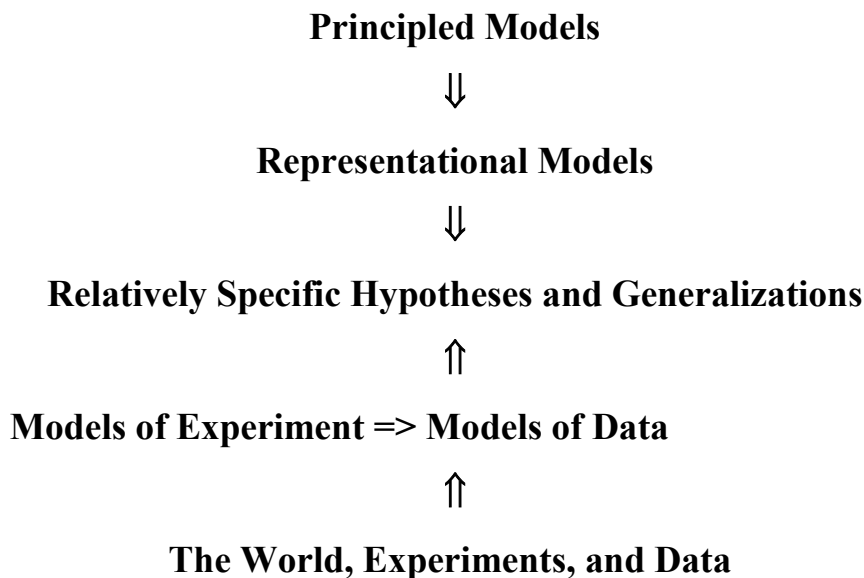
<sup>35</sup> Con la scoperta della gravitazione universale da parte di Newton, le leggi di Keplero appaiono regole relative a casi specifici particolari, tutte derivanti da quell'unica teoria. La legge di gravitazione universale permette di dedurre i moti dei pianeti ed è applicabile non solo ai corpi celesti ma a tutti i corpi in generale, proporzionalmente alla loro massa. Essa consente di spiegare oltre alle traiettorie dei loro moti, anche molti altri fenomeni che li riguardano. Va inoltre puntualizzato che le leggi di Keplero sono precise solo a condizione che vengano soddisfatte le seguenti ipotesi: la massa del pianeta deve essere trascurabile rispetto a quella della stella di riferimento così come devono poter essere trascurabili le interazioni tra diversi pianeti (tali interazioni portano a leggere perturbazioni sulla forma delle orbite). A questo proposito si consulti la voce «Fenomenologia» nel *Glossario di Scienza per Tutti*, sito a cura dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, <http://scienzapertutti.infn.it/php/glossario.php?Testo=Fenomenologia>; L. Landau, A. Kitaigorodskij, *La fisica per tutti*, Editori Riuniti, Roma, 2014, pp. 163-168; P. A. Tipler, *Meccanica, onde, termodinamica*, Zanichelli, Bologna, 1995, p. 353-361; I. B. Cohen, «Newton e la scoperta della gravità», *Le Scienze*, 153, maggio 1981, anno XIV, volume XXVI, pp. 124-136.

<sup>36</sup> Sono definiti tali, da Giere, i modelli che incorporano i principi fondamentali di una qualche teoria. Id., «Using Models to Represent Reality», cit., p. 51.

<sup>37</sup> Come ricorda lo stesso Giere (ivi, pp. 54-55), l'idea di una gerarchia di modelli si deve originariamente a Patrick Suppes. Id., «Models of data», in E. Nagel, P. Suppes, A. Tarski (a cura di), *Logic, Methodology and the Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress*, Stanford University Press, Stanford (CA), 1962, pp. 252-261. Sulla gerarchia proposta da Suppes si veda V. Fano, *Comprendere la scienza*, cit., pp. 88-92.

<sup>38</sup> Scrive Suppes: «The precise definition of models of the data for any given experiment requires that there be a theory of the data in the sense of the experimental procedure, as well as in the ordinary sense of the empirical theory of the phenomena being studied». Id., «Models of data», cit., p. 253. E ancora: «It is a fundamental contribution of modern mathematical statistics to have recognized the explicit need of a model in analyzing the significance of experimental data». Ivi, p. 260. Interessanti osservazioni a proposito si trovano in M.C. Galavotti, «On Patrick Suppes' philosophy of science», in P. Humphreys (a cura di), *Patrick Suppes: Scientific Philosopher*, 3, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NE), 1994, pp. 245-264.

come filo conduttore per dirimere possibili dubbi circa i rapporti tra teoria e modello e modello e realtà, possiamo innanzitutto constatare come, per quanto concerne il primo caso, la distinzione in un certo senso scompare<sup>39</sup> poiché gli assunti fondamentali su cui le teorie poggiano vengono impiegati per costruire i cosiddetti modelli di principi, dei quali, pertanto, risultano automaticamente veri.



**Fig. 2** Gerarchia di modelli che media tra teoria e realtà<sup>40</sup>

All'interno di questa particolare prospettiva, le leggi di Newton – così come i principi della termodinamica, i principi dell'elettrodinamica di Maxell o l'equazione di Schrödinger, per citarne solo alcuni – non rappresentano

---

<sup>39</sup> Così scrive Giere riferendosi allo schema che esemplifica la gerarchia di modelli che media il rapporto tra teoria e realtà: «statements that are often taken to constitute theories function to characterize the principled models. Such statements are automatically true of the principled models. To invoke a canonical example, what are called “Newton’s Laws of Motion” are for me principles that characterize a class of highly abstract models (principled models) and thus characterize a particular mechanical perspective on the world.». Id., «An Agent-Based Conception of Models and Scientific Representation», *Synthese*, 172 (2), 2010, pp. 269–281, p. 270.

<sup>40</sup> Schema tratto da *Ibidem*.

leggi di natura universalmente valide, ovvero generalizzazioni empiriche dotate di *status* nomologico, bensì principi che definiscono una classe di modelli altamente astratti – i modelli di principi appunto – i quali, presi di per sé, non possono legittimamente avanzare alcuna pretesa rappresentazionale su oggetti e fenomeni reali<sup>41</sup>. Ciò significa, spiega Paul Teller, che – ad esempio – un modello basato sui soli principi della meccanica non consente di compiere affermazioni empiriche sul mondo, poiché descrive unicamente oggetti dotati di massa che si muovono con velocità e accelerazioni non precisate, soggetti a forze non ulteriormente specificate, ad eccezione di quanto richiesto dalla soddisfazione delle tre leggi<sup>42</sup>. Affinché dai modelli di principi sia possibile derivare un *corpus* di conoscenze – per quanto probabilistiche e provvisorie – concernenti particolari sistemi fisici trovati nel mondo (molle, pendoli, proiettili, pianeti), occorre dunque caratterizzare in maniera sempre più specifica questi oggetti altamente astratti fino ad ottenere modelli rappresentazionali completamente determinati. Per questo motivo Giere – accogliendo un’istanza già avanzata da Nancy Cartwright<sup>43</sup> – propone di attribuire alle leggi newtoniane il ruolo di meri schemi generali (*template*) da completare di volta in volta con particolari funzioni di forza<sup>44</sup> (funzioni lineari, funzioni

---

<sup>41</sup> Scrive Giere: «Newton’s Laws are not “Laws of Nature” in the sense of universal generalizations over things in the world. They cannot by themselves be used to make any direct claims about the world. They don’t “represent” anything». *Ibidem*. E ancora: «I think it is best not to regard principles themselves as vehicles for making empirical claims. Newton’s three laws of motion, for example, refer to quantities called force and mass, and relate these to quantities previously well-understood: position, velocity, and acceleration. But they do not themselves tell us in more specific terms what might count as a force or a mass. So we do not know where in the world to look to see whether or not the laws apply. One can give a similar account of the evolutionary principles of variation, selection, and transmission». Id., «How Models Are Used to Represent Reality», *Philosophy of Science*, 71(5), 2004, pp. 742–752.

<sup>42</sup> P. Teller, «“Saving the Phenomena” Today», *Philosophy of Science*, 77(5), 2010, pp. 815–826, p. 821.

<sup>43</sup> N. Cartwright, *How the laws of physics lie*, Oxford University Press, New York, 1983.

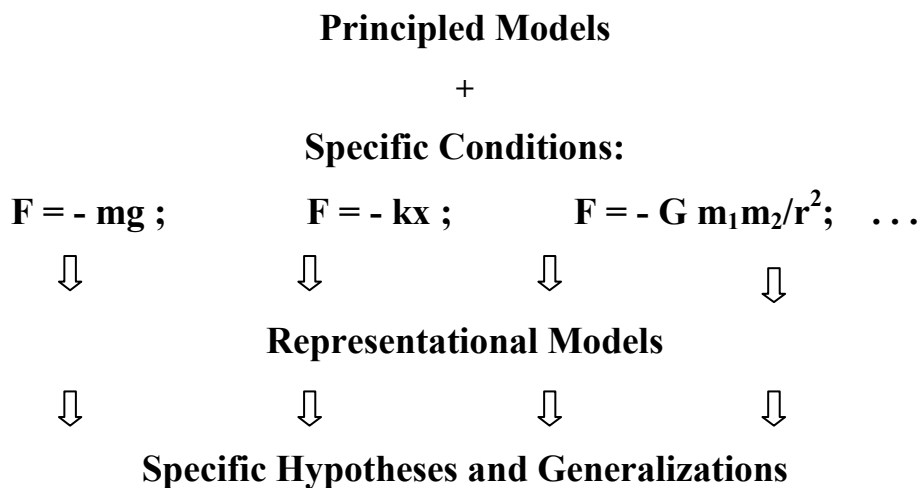
<sup>44</sup> Come nota Giere, le funzioni di forza rappresentano il più importante principio di organizzazione nella maggior parte dei manuali di meccanica classica. Id., *Spiegare la scienza: un approccio cognitivista*, Il mulino, Bologna, 1996, p. 113.



dell'inverso del quadrato, ecc.) così da generare famiglie di modelli rappresentazionali ordinabili gerarchicamente secondo vari gradi di astrazione – dai più generali fino alle loro versioni più specifiche – nei quali, al posto del concetto di forza, compaiono concetti quali massa, distanza e velocità. Così si esprime lo studioso:

Note that here what is usually called Newton's "Theory" consists only of the statements of the three laws. These alone characterize the principled models. The Law of Universal Gravitation is thus not a part of the core theory. It constitutes a specification of a kind of representational model. Other specifications include linear motion in a uniform gravitational field (a falling body) and a linear restoring force (a harmonic oscillator). Thus the hierarchy of models for classical mechanics is in fact a multiple hierarchy characterized by various possible force functions. Once a force function is added, the concept of force itself drops out of the specification of a representational model, replaced by such things as mass, distance and velocity<sup>45</sup>.

Dettagliando lo schema precedente si ottiene quindi:



**Fig. 3** Parte superiore della gerarchia di modelli della meccanica classica<sup>46</sup>

<sup>45</sup> R. Giere, «An agent-based conception of models and scientific representation», cit., p. 271.

<sup>46</sup> *Ibidem*.

Una volta determinato il modello di uno specifico sistema reale dal quale poter derivare ipotesi<sup>47</sup> empiricamente verificabili, sarà sufficiente connettere i simboli matematici del modello – che è un oggetto astratto ma non puramente formale poiché nasce già dotato di interpretazione fisica – con gli elementi di quel particolare sistema reale<sup>48</sup> per poter validare le previsioni teoriche tramite il confronto con un modello dei dati (di quello stesso sistema), elaborato a partire dalla manipolazione statistica dei dati grezzi rilevati dagli strumenti di misura unitamente alle conoscenze teoriche e contestuali che intervengono nella sperimentazione che li ha prodotti<sup>49</sup>.

Considerando ad esempio la funzione di forza  $F = -g$  (con il valore di  $g$  indeterminato) e combinandola con la seconda legge di Newton – che ha la forma matematica di un'equazione differenziale del secondo ordine<sup>50</sup> – si ottiene il modello di un punto materiale soggetto esclusivamente a una forza centrale gravitazionale<sup>51</sup>, ovvero il problema galileiano di un corpo che cade in un campo gravitazionale supposto uniforme. Tale modello astratto – che può essere reso più specifico tenendo conto di forze aggiuntive come la forza di attrito – pur consentendo di prevedere il tempo  $t$  in cui un generico corpo rilasciato da un'altezza  $h$  colpirà il suolo secondo la relazione  $h = \frac{1}{2}gt^2$ , non ammette, nella sua generalità, ancora alcun confronto diretto con un sistema reale. Solo identificando il punto materiale con un oggetto

---

<sup>47</sup> Le ipotesi sono da intendersi come affermazioni che connettono un modello completamente interpretato e specificato con un particolare sistema reale specificandone il grado di somiglianza.

<sup>48</sup> Scrive Giere: «Considerando, per esempio, la formula  $f=-kx$ , possiamo interpretare  $x$  come lo spostamento di una particella dalla sua posizione di quiete. Nell'applicare la formula allo studio di una massa particolare su una molla, noi *identifichiamo*  $x$  con lo spostamento di questa particolare massa dalla sua posizione di equilibrio». Id., *Spiegare la scienza*, cit., p. 125.

<sup>49</sup> Per un approfondimento si rinvia a P. Teller, «“Saving the Phenomena” Today», cit.; M.R. Matthews, «Learning about Scientific Methodology and the “Big Picture” of Science: The Contribution of Pendulum Motion Studies», in *Philosophy of Education Yearbook*, 2001, pp. 204-213, in particolare pp. 209-211.

<sup>50</sup>  $F = ma = md^2x/dt^2$

<sup>51</sup> Esempio tratto da R. Giere, «Models, Metaphysics and Methodology», in S. Hartmann, C. Hoefer, L. Bovens (a cura di), *Nancy Cartwright's Philosophy of Science*, Routledge, New York, 2008, pp. 123-136, p. 125.

concreto ed attribuendo alle variabili matematiche, fisicamente interpretate ma lasciate precedentemente indeterminate, un preciso valore numerico, sarà possibile sottoporre le sue previsioni al vaglio empirico.

Se, dunque, la funzione rappresentazionale dei modelli ci ricorda, in ultima istanza, che la loro bontà dipende dal grado di adeguatezza empirica – ovvero dalla capacità di selezionare gli aspetti rilevanti di un qualche sistema reale in relazione a qualche obiettivo prestabilito – ciò non deve tuttavia minare l'autonomia che loro compete sul piano strettamente matematico. La prima metà dello schema di Giere mostra, infatti, come la costruzione dei modelli avvenga in totale indipendenza dalla pretesa di fornire informazioni sul mondo empirico. In altri termini, la fase costruttiva è da interpretarsi come la fase del possibile dove l'attività fondamentale è definire sistemi idealizzati entro il dominio concettuale del mondo newtoniano, esplorarne le caratteristiche nonché analizzarne le evoluzioni e le possibili complessificazioni, esattamente come fosse un esercizio matematico. Ne consegue come qualsiasi conclusione riguardi esclusivamente il modello del quale se è vera, lo è appunto per definizione. Non solo. La costruzione di modelli rappresentazionali completamente specificati – i soli direttamente confrontabili con i fenomeni empirici – a partire dai generalissimi modelli di principi non ha la forma di una deduzione logica<sup>52</sup> ma, nella maggior parte dei casi, è un'attività molto complessa in cui intervengono peculiari prassi epistemiche che gli scienziati acquisiscono tacitamente con la pratica – in quanto «incorporate in esemplari comunemente condivisi»<sup>53</sup> – senza tuttavia sottoporle a una tematizzazione esplicita e riflessiva.

---

<sup>52</sup> R. Giere, «How Models Are Used to Represent Reality», cit., p. 744, nota n. 4. A questo proposito, anche Nancy Cartwright riconosce come la costruzione di modelli possa essere un'attività molto complessa e richiedere spesso una serie di approssimazioni e semplificazioni. Id., *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

<sup>53</sup> T. S. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., p. 231.

Prima di approfondire il discorso lungo questa direzione vorremmo tuttavia fornire una qualche giustificazione in merito all'adozione della similarità selettiva<sup>54</sup>, assunta fino a questo momento in maniera ap problematica, come modalità di relazione fra modelli e realtà. Il tentativo di fondare la funzione rappresentazionale dei modelli su tale tipo di nozione – per quanto in apparenza plausibile – nasconde tuttavia delle criticità che devono essere analizzate poiché, in modi differenti, intercettano la questione fondamentale già sollevata da Koyré<sup>55</sup> di come si possa spiegare l'essere reale (i fenomeni empirici) con l'impossibile (i sistemi idealizzati socialmente costruiti).

La tesi che asserisce “un modello A rappresenta il sistema reale B poiché assomiglia a B” – così com'è formulata – sembra, infatti, indurre alla conclusione che tra un oggetto astratto (fisicamente impossibile) descritto da equazioni e un fenomeno empirico possa sussistere una qualche somiglianza “oggettiva”, ovvero fondata nella natura dei *relata* e quindi indipendente dalle intenzioni e dagli scopi di coloro che costruiscono il modello. Ora, questo non è possibile poiché il nesso di somiglianza che lega un “oggetto” ideale e uno reale non è di tipo percettivo<sup>56</sup>, bensì di tipo epistemico; tale relazione, pertanto, non si impone con immediatezza in quanto intuitivamente evidente, ma viene imposta – per così dire – dall'esterno, dovendo essere istituita a mezzo di peculiari prassi epistemiche caratteristiche della scienza empirico-matematica (ad esempio, l'idealizzazione e l'approssimazione), alla cui comprensione è in definitiva subordinato il suo riconoscimento.

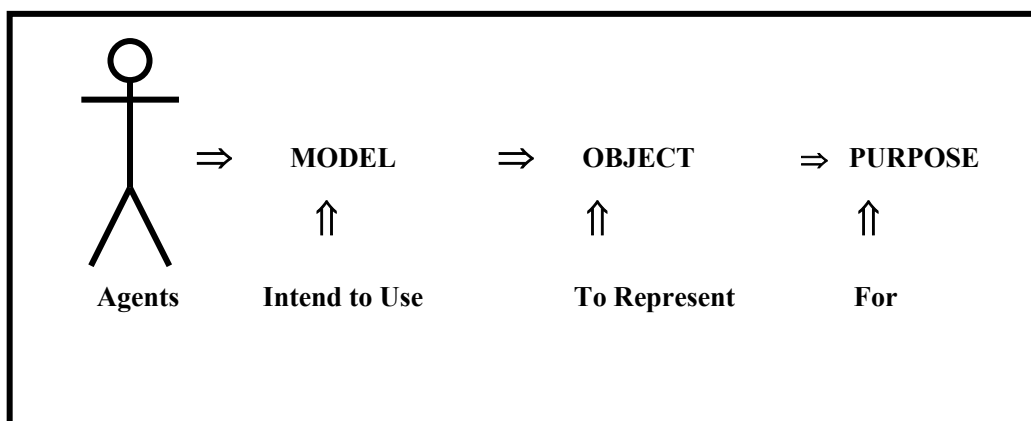
---

<sup>54</sup> R. Giere, «Representing with physical models», cit.

<sup>55</sup> A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, Vallecchi, Firenze, 1956.

<sup>56</sup> Sul tema della somiglianza percettiva si rinvia a G. Piana, *Elementi di una dottrina dell'esperienza: saggio di filosofia fenomenologica*, Il Saggiatore, Milano, 1979; Id., *Fenomenologia e psicologia della forma*, testo tratto dalle lezioni tenute nel 1988 per il corso di Filosofia Teoretica (Università degli Studi di Milano), reperibile all'indirizzo Internet: [http://www.filosofia.unimi.it/~giovannipiana/psicologia\\_della\\_forma/pdf/psicologia\\_della\\_forma.pdf](http://www.filosofia.unimi.it/~giovannipiana/psicologia_della_forma/pdf/psicologia_della_forma.pdf). Sul rapporto tra somiglianza e rappresentazione si rinvia a P. Spinicci, «Nomi, raffigurazioni, carte geografiche», *Aut Aut*, 324, dicembre 2004, pp. 103-125.

Vi è inoltre un secondo aspetto da non sottovalutare: la somiglianza, come nota Mauricio Suarez<sup>57</sup> rifacendosi a un'obiezione originariamente mossa da Nelson Goodman<sup>58</sup>, è una relazione simmetrica contrariamente alla rappresentazione che invece è asimmetrica. Se A è simile a B, B è a sua volta simile ad A. Questo, tuttavia, non vale per la relazione rappresentativa: il fatto che un modello rappresenti un fenomeno non significa che il fenomeno rappresenti a sua volta quel modello. Il rappresentante e il rappresentato non possono essere invertiti pena, sostiene Goodman, la violazione delle proprietà logiche della rappresentazione.



**Fig.4** Schema della concezione intenzionale della rappresentazione scientifica<sup>59</sup>

Tali difficoltà, secondo Giere, possono essere aggirate introducendo come terzo elemento nella relazione tra modello e mondo, un agente intenzionale – ossia un agente il cui comportamento è regolato e guidato da obiettivi e finalità identificabili<sup>60</sup> – capace di selezionare gli aspetti rilevanti e i gradi

<sup>57</sup> M. Suárez, «Scientific representation: Against similarity and isomorphism», *International Studies in the Philosophy of Science*, 17, 2003, pp. 225–244.

<sup>58</sup> N. Goodman, *I linguaggi dell'arte*, Il saggiatore, Milano, 2013. Per un commento alla posizione di Goodman si rinvia a P. Spinicci, «Nomi, raffigurazioni, carte geografiche», cit.

<sup>59</sup> Schema tratto da R. Giere, «An Agent-Based Conception of Models and Scientific Representation», cit., p. 275.

<sup>60</sup> Per un approfondimento si rinvia a M. Tomasello, *Le origini della comunicazione umana*, Cortina Raffaello, Milano, 2009, in particolare pp. 25-57. Questo aspetto verrà ripreso e discusso in maniera più dettagliata all'interno del terzo capitolo.

desiderati di similitudine, nonché di rompere la simmetria indicando che il modello viene impiegato per rappresentare il sistema reale. Questa dinamica che, spostando il *focus* dal prodotto al processo, sottende una «concezione intenzionale della rappresentazione scientifica» viene adeguatamente esemplificata dallo schema riportato in figura 4. In questo modo, l'esigenza di ricorrere a un agente intenzionale – emersa in maniera più o meno esplicita nel corso della discussione attorno ai differenti tipi di modelli – non risulta meramente contingente e di natura pragmatica, ma trova una sua piena giustificazione nell'assenza di un'intrinseca relazione rappresentazionale tra modelli e aspetti del mondo, assumendo pertanto una valenza costitutiva per quanto concerne la possibilità del loro utilizzo.

Riformulata secondo un'angolatura meno metafisica, la tesi di Koyré circa il mirabile paradosso della scienza moderna che spiega il «reale assumendo come base di partenza l'impossibile»<sup>61</sup> risuona, dunque, in questi termini: un modello può rappresentare con un certo grado di approssimazione un sistema empirico in virtù del fatto che gli scienziati (in qualità di agenti cognitivi) hanno intenzionalmente istituito mediante opportune prassi epistemiche una relazione di somiglianza selettiva tra il modello e alcuni aspetti del sistema stesso per specifici scopi connessi al suo impiego. Al fine di conferire pertinenza e concretezza a queste osservazioni andremo ora ad analizzare in dettaglio il modello dell'oscillatore lineare che Giere annovera tra gli «esempi principali» di quegli «schemi *esemplari* sui quali sono modellati gli altri modelli teorici»<sup>62</sup>. In ragione dell'angolazione epistemologico-didattica del presente lavoro, l'obiettivo dell'analisi consiste principalmente nell'esplicitare, muovendo da una prospettiva descrittiva tendente alla chiarificazione concettuale, alcune delle operazioni teoriche sottese al processo di modellizzazione che hanno

---

<sup>61</sup> A. Koyré, *Studi galileiani*, Einaudi, Torino, 1979, p. 210.

<sup>62</sup> R. Giere, *Spiegare la scienza*, cit., p. 131.

rappresentato per gli stessi scienziati, e che tuttora rappresentano per i discenti, dei veri e propri ostacoli epistemologici.

#### 4. Il modello dell'oscillatore lineare<sup>63</sup>

L'oscillatore lineare è un sistema dinamico soggetto a una forza lineare di richiamo<sup>64</sup> unitamente ad altre forze secondarie. Tra i moti oscillatori, il più comune e importante<sup>65</sup> è il moto armonico semplice, un moto periodico<sup>66</sup> unidimensionale che si verifica solo nel caso in cui il corpo è sottoposto unicamente all'azione di una forza di richiamo, la quale determina il suo continuo oscillare attorno al punto di equilibrio, accelerandolo quando se ne avvicina e decelerando quando se ne allontana. Esprimendo l'intensità della forza di richiamo in funzione dello spostamento  $x$  del corpo dal punto di equilibrio si ottiene l'equazione

$$(1) \qquad F = -kx$$

---

<sup>63</sup> Per la stesura di questo paragrafo si è fatto riferimento non solo all'analisi proposta da Giere (Ivi, pp.116-124), ma anche alla rielaborazione offertane da Vincenzo Fano (Id., *Comprendere la scienza*, cit., pp. 49-52). Per alcuni aspetti tecnici si è inoltre consultato: P. A. Tipler, *Meccanica, onde, termodinamica*, cit.; D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di Fisica*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2015; U. Amaldi, *Le traiettorie della fisica. Da Galileo a Heisenberg*, Zanichelli, Bologna, 2012; L. Landau, A. Kitaigorodskij, *La fisica per tutti*, cit.; il sito gestito da professori di Fisica della scuola secondaria di secondo grado [http://www.openfisica.com/fisica\\_ipertesto/onde/index.php](http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/onde/index.php); gli appunti integrativi delle lezioni del Prof. Antimo Palano (INFN e Università di Bari) e della Prof.ssa Francesca Soramel (Università di Udine), disponibili rispettivamente ai seguenti indirizzi: [http://www.ba.infn.it/~palano/lab/book\\_lab/it/Chap\\_3/sec\\_9/index.html](http://www.ba.infn.it/~palano/lab/book_lab/it/Chap_3/sec_9/index.html), <http://www.fisica.uniud.it/~soramel/motoarmonico.pdf>.

<sup>64</sup> Con forza di richiamo s'intende una forza centrale diretta verso un punto di equilibrio che cresce in maniera direttamente proporzionale allo spostamento negativo del corpo da questa posizione di riposo.

<sup>65</sup> Questo particolare tipo di moto assume un ruolo fondamentale poiché alla sua descrizione si rifanno anche numerosi altri fenomeni fisici, non limitati al solo campo della meccanica.

<sup>66</sup> Il moto di una particella si dice periodico quando ad intervalli di tempo regolari la particella torna a passare nella stessa posizione con la stessa velocità.

che, combinata con la seconda legge di Newton conduce all'equazione differenziale del secondo ordine

$$(2) \qquad F = ma = md^2x/dt^2 = -kx$$

(dove  $k$  rappresenta la costante di proporzionalità), la quale consente di calcolare sia  $x$  che  $v$  in funzione del tempo.

I sistemi meccanici che generalmente compaiono nei manuali scientifici in qualità di esempi paradigmatici di oscillatori armonici semplici sono una massa attaccata ad una molla e il pendolo matematico, qualora ci si limiti a piccoli angoli di oscillazione. Nel primo caso, la legge di Hooke afferma che la forza esercitata da un qualsiasi corpo elastico è direttamente proporzionale al suo allungamento; pertanto, quando il corpo attaccato a una molla subisce uno spostamento  $x$  rispetto alla sua posizione di equilibrio, la molla esercita su di esso una forza  $-kx$ , dove la costante elastica  $k$ , interpretata come misura di rigidità della molla, dipende solamente dalle sue caratteristiche costitutive.

A questo punto, la quasi totalità dei testi di meccanica premette alla trattazione matematica del caso in questione, un elenco di assunzioni semplificanti (idealizzazioni)<sup>67</sup> che, all'interno dell'economia del discorso, assolvono una duplice funzione: da un lato definiscono esplicitamente l'oggetto astratto ovvero l'entità costruita di cui è vera – anche se in senso banale – l'equazione del moto armonico semplice (2), mentre dall'altro suggeriscono implicitamente<sup>68</sup> le condizioni di applicabilità di suddette equazioni a casi reali. In questo senso si può quindi legittimamente sostenere che le equazioni interpretate sono vere del modello teorico

---

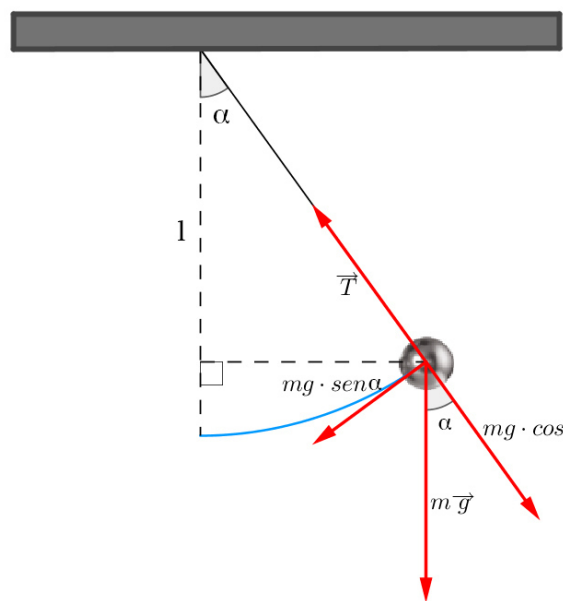
<sup>67</sup> Ad esempio: la molla non è soggetta ad attriti né interni né esterni, è priva di massa e ha una relazione forza-spostamento di tipo lineare; la massa non è soggetta ad alcun tipo di attrito; la parete cui è attaccata un'estremità della molla è perfettamente rigida. R. Giere, *Spiegare la scienza*, cit., p. 117

<sup>68</sup> Questo aspetto verrà discusso in particolare nell'ultimo paragrafo del quarto capitolo.



corrispondente proprio perché il sistema massa-molla (proposto dagli autori per illustrare la legge di Hooke e il moto armonico semplice) non è un sistema reale ma un sistema ideale che, a differenza delle sue possibili realizzazioni fisiche, è stato costruito per soddisfare perfettamente le sue equazioni di moto.

Considerazioni analoghe valgono per il secondo esempio di oscillatore armonico, la cui descrizione in termini matematici a partire dall'esempio della molla rappresenta, secondo Giere, un chiaro caso di ciò che Kuhn intendeva con «modellizzazione diretta» di problemi nuovi a partire da esemplari paradigmatici, sulla base di relazioni di somiglianza acquisite mediante l'adesione a un medesimo paradigma<sup>69</sup>.



**Fig. 4** Il pendolo semplice o pendolo matematico

<sup>69</sup> R. Giere, *Spiegare la Scienza*, cit., p.120. Su questo aspetto ci soffermeremo in particolare nel paragrafo 7.

Si definisce pendolo semplice (o matematico) un sistema fisico costituito da una massa puntiforme ( $m$ ) soggetta a un campo gravitazionale supposto uniforme e sospesa ad un filo inestensibile privo di massa (ovvero di massa trascurabile rispetto alla massa  $m$ ), fissato all'altro estremo a un perno privo di attrito, che oscilla lungo un arco di circonferenza posta in un piano verticale, con centro nel punto di sospensione ( $O$ ) e raggio pari alla lunghezza ( $l$ ) del filo.

Preso un sistema di riferimento ortogonale e fatto coincidere l'asse  $y$  con la verticale del pendolo, le forze agenti sulla pallina sono rispettivamente la sua forza peso  $F = mg$  diretta verticalmente verso il basso e la tensione  $T$  nel filo diretta verticalmente verso il centro di oscillazione, le quali, in caso di posizione di equilibrio stabile<sup>70</sup> del pendolo, si compensano reciprocamente. Quando invece il filo viene a formare un angolo  $\alpha$  con la verticale – ovvero quando forza peso e tensione del filo non sono più allineate – la risultante delle due forze può essere calcolata scomponendo la forza peso in una componente radiale  $mg \cos(\alpha)$  diretta lungo il filo ed una componente tangenziale  $mg \sin(\alpha)$  nel verso di  $\alpha$  decrescente. La risultante tra la componente radiale di  $F$  e la tensione del filo fornisce la forza centripeta a cui si deve il moto circolare<sup>71</sup> come mostra la seguente equazione:

$$(3) \quad T - mg \cos(\alpha) = ma_c = mv^2/r$$

La componente tangenziale della forza peso  $F_{tg} = mg \sin(\alpha)$  a cui si deve invece l'accelerazione del pendolo lungo tale traiettoria può essere a sua volta scomposta nelle componenti orizzontale e verticale, che si ottengono

---

<sup>70</sup> La posizione di equilibrio è la posizione più bassa che la pallina può raggiungere sulla base del vincolo cui è sottoposta.

<sup>71</sup> Il corpo, infatti, si muove su un arco di cerchio per cui il vettore cambierà costantemente di direzione e quindi avremo una accelerazione centripeta diretta verso il punto di sospensione.

proiettando  $F_{tg}$  lungo gli assi ortogonali di un sistema cartesiano con origine coincidente con l'origine del vettore

$$(4) \quad F_{tgx} = mg \sin(\alpha)\cos(\alpha)$$

$$(5) \quad F_{tgy} = mg \sin^2(\alpha)$$

Sebbene considerato nella sua generalità il moto del pendolo non presenti alcuna immediata somiglianza con il moto armonico della molla (moto rettilineo con forza di richiamo direttamente proporzionale allo spostamento), è tuttavia possibile per chi, collocandosi all'interno del paradigma galileiano-newtoniano, ha imparato a riconoscere analogie tra fenomeni apparentemente diversi, ricondurre il primo al secondo grazie a «un'assennata approssimazione»<sup>72</sup>. Vincolando la variabilità dell'angolo  $\alpha$  a piccole oscillazioni, infatti, l'arco di circonferenza percorso dal punto materiale si riduce ad un tratto approssimativamente rettilineo, con conseguente annullamento della forza centripeta (3) e della componente verticale della forza tangenziale (5). L'unica forza in gioco rimane, dunque, la componente orizzontale della forza tangenziale  $F_{tgx}$  che combinata con la seconda legge di Newton diventa:

$$(6) \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = -mg \sin(\alpha)\cos(\alpha)$$

Tenendo conto che  $\sin(\alpha) = x/l$  e che per piccole oscillazioni  $\cos(\alpha)$  è circa uguale a 1<sup>73</sup>, l'equazione (6) si riduce a

---

<sup>72</sup> Giere sostiene, infatti, come il passo dall'applicazione originale delle leggi di newton a un pendolo bi-dimensionale, alla versione a una dimensione *non* è un fatto di pura deduzione matematica o logica. Id., *Spiegare la Scienza*, cit., p.120

<sup>73</sup> Questo è un esempio di approssimazione matematica, prassi abitualmente diffusa nella costruzione di modelli a cui abbiamo dedicato parte del paragrafo 6. Senza

$$(7) \quad m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\left(m \frac{g}{l}\right)x$$

dove la costante  $mg/l$  gioca il ruolo della costante di elasticità nell'esempio della legge di Hooke, verificando quindi le condizioni del moto armonico. Risolvendo tale equazione differenziale del secondo ordine si ottiene infine l'equazione del moto del pendolo

$$(8) \quad x = A \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t\right) + c$$

(dove le costanti  $A$  e  $c$  dipendono dalle condizioni iniziali), con cui è possibile calcolare la distanza del punto materiale dalla verticale in funzione del tempo e da cui è possibile evincere come il periodo d'oscillazione<sup>74</sup> del pendolo dato dall'equazione

$$(9) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

dipenda unicamente – naturalmente solo nel caso di piccole oscillazioni – dalla lunghezza del filo e dall'accelerazione di gravità, in accordo dunque con i risultati di Galileo e Newton.

Nel caso un pendolo reale soddisfi con un buon grado di approssimazione i vincoli imposti dalle idealizzazioni iniziali e dalla successiva approssimazione, intrattenendo pertanto un'adeguata relazione di somiglianza con il modello rappresentazionale ideale, allora le previsioni teoriche fornite dall'equazione (8) – derivata combinando la seconda legge di Newton con una specifica funzione di forza (7) che grazie

---

l'approssimazione a piccoli angoli d'oscillazione, la componente orizzontale della forza tangenziale è rappresentata da un'equazione differenziale non lineare, non risolubile mediante funzioni elementari e quindi matematicamente complessa da risolvere.

<sup>74</sup> Il periodo d'oscillazione è il tempo necessario per compiere un'oscillazione completa.

all'approssimazione a piccoli angoli di oscillazioni ha assunto la forma semplificata  $F_{tgx} = -(m\frac{g}{l})x$  – riveleranno un accordo altrettanto soddisfacente con il modello dei dati ottenuto sottoponendo ad analisi statistica le misurazioni effettuate sul sistema fisico reale.

A partire da queste considerazioni che, ricordiamo, emergono da un approccio descrittivo alla teoria newtoniana così come si trova esposta nei manuali standard su cui si formano gli scienziati<sup>75</sup>, è possibile mettere in luce il differente ruolo epistemologico che compete a queste tre equazioni<sup>76</sup>. L'equazione (8) – dove compaiono lo spazio, il tempo e la lunghezza del filo – descrive matematicamente il moto del pendolo ed è l'unica soggetta a verifica empirica. In gergo tecnico viene definita una legge fenomenologica o approssimata<sup>77</sup> in quanto descrive le relazioni tra le grandezze fisiche coinvolte in un fenomeno senza tuttavia fare riferimento alle cause che lo determinano. L'equazione della forza  $F_{tgx}$  svolge, invece, una funzione esplicativa poiché descrive la causa del moto e rappresenta un tipo di legge più generale, verificabile solo in maniera indiretta attraverso le conseguenze (nella fattispecie appunto l'equazione 8) che genera. Il secondo principio della dinamica, infine, assume una valenza prettamente strumentale, consentendo di derivare l'equazione del moto (8) da quella della forza (7).

In sintesi la (8) risponde alla domanda sul *come* avviene il moto del pendolo, la (7) sul *perché* avviene, mentre il secondo principio non risponde ad alcun interrogativo, pur giocando di fatto un ruolo fondamentale nel passaggio dalla (7) alla (8) e quindi nella costruzione di modelli rappresentazionali validabili empiricamente.

Questo per quanto concerne il pendolo semplice, dove le uniche forze ammesse sono di tipo conservativo. A partire da questo modello

---

<sup>75</sup> R. Giere, *Spiegare la Scienza*, cit., pp. 108-109.

<sup>76</sup> V. Fano, *Comprendere la scienza*, cit., pp. 51-52.

<sup>77</sup> Altri esempi di leggi fenomenologiche o approssimate sono le leggi di Keplero su cui ci siamo soffermati nella nota n. 35 alla quale rinviamo.

estremamente idealizzato si possono successivamente costruire modelli più complessi introducendo altri tipi di forze. Aggiungendo, ad esempio, una forza dissipativa come l'attrito così da rendere le previsioni teoriche del modello più rappresentative del comportamento di un pendolo reale<sup>78</sup>, si ottiene l'oscillatore lineare smorzato, ovvero un sistema in moto armonico semplice all'interno di un mezzo resistente. Stimando inizialmente l'attrito – in questo caso la resistenza dell'aria sul pendolo – come funzione lineare della velocità, la seconda legge assume la forma:

$$(10) \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = - \left( m \frac{g}{l} \right) x + bv$$

A seconda dei valori assunti da  $b$  lo smorzamento viene definito sottocritico, critico o sovracritico. Limitandoci ad una descrizione in termini qualitativi e generali, è possibile osservare come nel primo caso il moto sia ancora oscillatorio benché il periodo risulti aumentato rispetto al caso ideale privo d'attrito (il pendolo oscilla quindi più lentamente) e l'ampiezza delle oscillazioni decresca esponenzialmente rispetto al tempo. In caso di smorzamento elevato non vi è invece alcuna oscillazione ma solo un movimento monotono verso la posizione di equilibrio e così anche in caso di smorzamento critico, sebbene la posizione di riposo venga raggiunta in un minor tempo. Naturalmente è possibile complicare ulteriormente il modello introducendo oltre alla forza d'attrito funzione della velocità, una forza ad essa contraria dipendente dal tempo – pendolo forzato e smorzato<sup>79</sup> – fino a mettere capo ad un'intera famiglia di modelli che si irradia dal

---

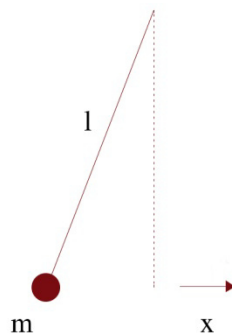
<sup>78</sup> Il pendolo reale è un esempio di sistema non conservativo che, dopo un certo intervallo di tempo, torna alla sua posizione di equilibrio stabile. Al problema del moto di un corpo in un mezzo resistente Newton dedica il secondo libro del suo capolavoro. Id., (1697), *Principi matematici della filosofia naturale*, a cura di A. Pala, UTET, Torino, 1989.

<sup>79</sup> In questo modo lo si rende più adatto a rappresentare il comportamento di un orologio a pendolo.

modello del pendolo semplice attraverso l'aggiunta di ulteriori specifiche funzioni di forza (si veda lo schema sottostante).

### **Pendolo semplice**

$$F(x) = -kx$$



### **Pendolo forzato**

$$F(x) = -kx - F(v)$$

### **Pendolo smorzato**

$$F(x) = -kx + F(t)$$

### **Pendolo smorzato e forzato**

$$F(x) = -kx - F(v) + F(t)$$

**Fig. 5** Esempio di famiglia di modelli di pendolo che si sviluppa a partire dal modello del pendolo semplice<sup>80</sup>

Compreso il meccanismo generatore di modelli rappresentazionali, possiamo ora porci come obiettivo una chiarificazione concettuale delle

---

<sup>80</sup> Schema tratto da R. Giere, «Visual Models and Scientific Judgment», in B. S. Baigrie (a cura di), *Picturing Knowledge: Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science*, University of Toronto Press, Toronto, 1996, pp. 269-302, p. 274.

prassi epistemiche coinvolte nell'attività di modellizzazione che, veicolando implicitamente le norme e i vincoli cui è sottoposto l'agire scientifico all'interno di una certa comunità, consentono di apprendere parallelamente anche il paradigma di riferimento.

### 5. *L'idealizzazione*

Ragionando a proposito di modelli è emerso come la loro utilità nel rappresentare aspetti del mondo si leghi a doppio filo al loro porsi come risultato di una prassi costitutiva di natura teoretica, capace di istituire una relazione di somiglianza tra elementi del modello ed aspetti della realtà. In altri termini, la particolarità dei modelli consiste nell'essere intenzionalmente progettati per individuare selettivamente alcune caratteristiche salienti dei fenomeni, sacrificando la fedeltà e la completezza della riproduzione in favore di una loro distorsione caricaturale che ne possa tuttavia garantire l'intelligibilità. In quest'ottica essi possono ragionevolmente essere ritenuti tra i principali strumenti rappresentazionali della scienza, dove con rappresentazione s'intende una costruzione teorico-astratta che rinvia a qualcosa di reale e concreto sulla base di una relazione di somiglianza non "oggettivamente" e immediatamente data<sup>81</sup>, bensì intenzionalmente istituita a partire da un nuovo genere di prassi epistemiche, i cui criteri di adeguatezza non possono essere stabiliti univocamente, una volta per tutte, ma devono essere di volta in volta discussi alla luce degli scopi e degli obiettivi di chi compie la modellizzazione.

Inizieremo quindi con l'occuparci dell'idealizzazione, intendendo questa operazione come il titolo generale sotto cui raccogliere alcune tecniche

---

<sup>81</sup> Nel senso precedentemente chiarito di fondato nella natura dei *relata*. Scrive, infatti, Giere: «One cannot, however, define an objective similarity relationship between an abstract model and any physical objects, one independent of human intent». Id., «Models, Metaphysics and Methodology», cit., p. 126.



proprie della razionalità scientifica tese a produrre una deliberata semplificazione della complessità del mondo empirico, o meglio del frammento che di volta in volta si prende in esame, al fine di conseguirne almeno una conoscenza parziale<sup>82</sup>. Per questo genere di prassi tesa alla semplificazione del problema di partenza attraverso la costruzione di un analogo dell'originale ma ridotto all' "essenziale", viene coniata da Ernan McMullin la definizione "idealizzazione di costruito" (*construct idealization*)<sup>83</sup>, volendo con questo termine sottolineare come, in questo caso, la semplificazione avvenga direttamente sul piano logico della rappresentazione concettuale. Sullo sfondo di questa precisazione – che circoscrive l'universo del nostro discorso a quel tipo di operazioni di natura teorica costitutive del modello in quanto oggettualità astratta – possiamo, ispirandoci all'articolo di Michael Weisberg<sup>84</sup>, effettuare un'ulteriore distinzione che ben si attaglia all'angolazione epistemologico-didattica da cui affrontiamo l'argomento. Nonostante la mancanza di un accordo unanime sulla natura e sul ruolo giocato dall'idealizzazione nella modellazione di fenomeni fisici, sono tre, secondo Weisberg, le posizioni che, all'interno dell'ampio e acceso dibattito, hanno guadagnato i maggiori

---

<sup>82</sup> E. McMullin, «Galilean idealization», *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 16 (3), 1985, pp. 247-273; J. Ladyman, «Idealization», in S. Psillos, M. Curd (a cura di), *The Routledge Companion to Philosophy of Science*, Routledge, London/New York, 2008, pp. 358-366. Sul ruolo dell'idealizzazione nella scienza si vedano inoltre M. Weisberg, «Three Kinds of Idealization», *Journal of Philosophy*, 104 (12), 2007, pp. 639-659; R. W. Batterman, «Idealization and modelling», *Synthese*, 169 (3), 2009, pp. 427-446; J. D. Norton, «Approximation and Idealization: Why the Difference Matters», *Philosophy of Science*, 79 (2), 2012, pp. 207-232;; R. Poli, «Astrazione e idealizzazione», *Verifiche*, 3, 1988, pp. 189-207; M. Niaz, «The Role of Idealization in Science and Its Implications for Science Education», *Journal of Science Education and Technology*, 8 (2), 1999, pp. 145-150; J. W. Garrison, «Husserl, Galileo and the Processes of Idealization», *Synthese*, 66 (2), 1986, pp. 329-338; L. Nowak, «The Idealizational Approach to Science: a Survey», in J. Brzeziński, L. Nowak (a cura di), *Idealization III: Approximation and Truth*. Poznań Studies in the Philosophy of Sciences and the Humanities, 25, Rodopi, Amsterdam/Atlanta, 1992, pp. 9-63.

<sup>83</sup> E. McMullin, «Galilean idealization», cit., pp. 254-259.

<sup>84</sup> M. Weisberg, «Three Kinds of Idealization», cit.

consensi e su cui, pertanto, concentreremo la nostra attenzione passandole rapidamente in disamina.

Il primo tipo di idealizzazione nota come «*Galilean idealization*» rappresenta il punto di vista tradizionale secondo il quale si aspira alla rappresentazione più dettagliata ed esatta possibile del fenomeno d'interesse. In questo caso l'introduzione di semplificazioni e distorsioni viene giustificata pragmaticamente per ragioni di trattabilità matematica o computazionale. In altre parole, le esigenze di semplificazione non riguardano il problema in sé, bensì lo strumento con cui lo si vuole indagare – la matematica appunto – che offre equazioni trattabili o risolubili solamente sotto certe determinate condizioni. Tale tipo di idealizzazione non è quindi ultimativa poiché, il modello semplificato cui si perviene funge esclusivamente da punto di partenza di un «programma di ricerca» volto ad un suo progressivo raffinamento. Ne consegue che le semplificazioni e distorsioni inizialmente introdotte devono essere progressivamente espunte dal modello originario, il quale subisce, pertanto, un processo di «de-idealizzazione» in vista di una sua pressoché totale convergenza con la realtà rappresentata<sup>85</sup>.

Con «*minimalist idealization*»<sup>86</sup> s'intende invece la tecnica di costruire modelli teorici includendovi esclusivamente quei fattori causali la cui presenza è determinante per il verificarsi o meno del fenomeno in questione, tecnica in virtù della quale le equazioni del modello assumono una forma estremamente semplificata, esattamente come nel caso precedente. Di conseguenza, «*Galilean idealization*» e «*minimalist idealization*» potrebbero, in un dato istante temporale, mettere capo ad un identico modello, salvo poi addurre giustificazioni affatto diverse per quanto

---

<sup>85</sup> Ivi, pp. 641-642.

<sup>86</sup> M. Weisberg, «Three Kinds of Idealization», cit., pp. 643. La distinzione tra *Galilean idealization* e *minimalist idealization* coincide con quella fra *traditional view* e *nontraditional view* discussa in R. W. Batterman, «Idealization and modelling», cit., pp. 427-431.

concerne l'appropriatezza delle idealizzazioni coinvolte: di natura pragmatica e connesse allo stadio di sviluppo della specifica disciplina le prime, essenzialmente di tipo cognitivo le seconde. Se dunque il progresso scientifico segnerà, almeno in linea di principio, il graduale abbandono dell'idealizzazione galileiana, differente sarà la sorte dell'idealizzazione minimale che mirando ad isolare, all'interno di un fenomeno, le sole grandezze responsabili della sua comparsa, riveste un ruolo cruciale per la spiegazione dello stesso<sup>87</sup>.

Per concludere un breve cenno alla «*multiple-models idealization*»<sup>88</sup> (idealizzazione a modelli multipli), ovvero la tecnica di costruire modelli multipli interrelati ma incompatibili, poiché contenenti differenti assunzioni idealizzanti riguardo il medesimo fenomeno. Questo tipo di idealizzazione è generalmente impiegata per modellizzare fenomeni estremamente complessi nel campo, ad esempio, dell'ecologia, della chimica sintetica o della meteorologia<sup>89</sup>. Differisce dalle precedenti per la molteplicità di obiettivi perseguiti, la cui natura eterogenea esclude di principio la ricerca di un unico modello atto a soddisfare simultaneamente sia quelli di carattere pragmatico connessi alla capacità predittiva del modello e/o alla realizzazione di applicazioni tecnologiche, sia quelli di carattere esplicativo maggiormente incentrati sulla comprensione del fenomeno indagato<sup>90</sup>. Riportando il *focus* del discorso sulla funzione dei processi idealizzanti nella costruzione dei modelli rappresentazionali della fisica, intendiamo ora avvalerci del modello paradigmatico del pendolo semplice per saggiare la

---

<sup>87</sup> Ivi, pp. 644-645.

<sup>88</sup> Ivi, pp. 646-647.

<sup>89</sup> Ricordiamo, a questo proposito, la distinzione tracciata da Giere tra modelli puramente matematici e modelli teorici che, al contrario dei primi, sono basati su principi fondamentali come appunto nel caso della meccanica. Quest'ultimo tipo di modelli citato da Weisberg viene quindi impiegato da quelle discipline che non hanno – o non ancora – principi fondamentali.

<sup>90</sup> Per ulteriori dettagli si rinvia a M. Weisberg, «Three Kinds of Idealization», cit., p. 643

bontà e la pertinenza di questa classificazione, sulla base delle istanze correlate ma distinte a cui ciascun tipo di idealizzazione risponde.

Abbiamo visto in precedenza come ogni modello, per la modalità stessa con cui è prodotto, rimandi intrinsecamente a una famiglia di appartenenza i cui i cui membri, differendo solamente per grado di specificità, sono legati tra loro non da connessioni logiche bensì da relazioni di somiglianza. In questo senso, il pendolo matematico appartiene alla famiglia dell'oscillatore lineare poiché identifica un particolare tipo di oscillatore armonico semplice in cui la forza lineare di richiamo è una funzione della gravità e della lunghezza della corda. Del pendolo, tuttavia, esistono differenti versioni (il pendolo smorzato, il pendolo forzato, il pendolo forzato-smorzato, il pendolo fisico, il pendolo fisico smorzato, il pendolo fisico smorzato forzato, ecc.) che, come abbiamo visto in precedenza, si irradiano dal modello originario altamente idealizzato grazie all'aggiunta di ulteriori specificazioni.

Volendo spiegare questa circostanza nei termini della «*Galilean idealization*» si potrebbe sostenere quanto segue: il modello del pendolo matematico, date le moltissime assunzioni semplificanti, difficilmente può fornire previsioni accurate circa il comportamento di pendoli reali i quali, sottoposti a forze dissipative che ostacolano il loro moto, non mantengono costante il loro periodo d'oscillazione e soprattutto non continuano ad oscillare all'infinito. Occorre quindi gradualmente rimuovere le idealizzazioni introdotte per motivi pragmatici di trattabilità matematica, nell'ottica a lungo termine di ridurre sempre più lo scarto tra le previsioni teoriche ricavate dal modello e le misurazioni empiriche effettuate sul sistema reale, in vista di possibili risvolti applicativi.

Da questo punto di vista il pendolo semplice svolge un ruolo puramente strumentale poiché rappresenta solamente un utile espediente matematico da cui generare, per continue integrazioni, modelli sempre più accurati, inclusivi tanto dei fattori perturbativi (pendolo smorzato) quanto dell'azione di altre possibili forze (pendolo smorzato forzato), a prezzo, tuttavia, di una

crescente complessità formale. La questione assume un significato del tutto diverso se invece ci poniamo sullo sfondo della cosiddetta «*minimal idealization*», che “riabilita” il modello altamente idealizzato valorizzandone la fondamentale funzione cognitiva: sfrondata di tutti i dettagli marginali, tale versione semplificata del fenomeno coglie infatti, ponendoli in evidenza, i soli fattori causalmente rilevanti per il prodursi del moto armonico semplice.

All'interno della concezione intenzionale della rappresentazione scientifica avanzata da Giere, entrambi i punti di vista sull'idealizzazione, per quanto antitetici, guadagnano pari dignità in quanto portavoce di due fondamentali istanze che orientano gli scienziati nella costruzione e nell'impiego di modelli: la spiegazione e la previsione. L'idealizzazione diviene pertanto il titolo generale sotto cui si raccolgono due esigenze che, se a livello operativo si trovano strettamente e comprensibilmente intrecciate, sul piano logico devono invece essere distinte per evitare di confondere ciò che pertiene alla dimensione concettuale della fisica con i vincoli imposti dall'apparato formale di cui tale disciplina dispone.

Da un lato, infatti, la scelta della matematica come linguaggio con cui rappresentare la realtà non è neutra rispetto alle tecniche che la fisica impiega nell'impostare e nel risolvere problemi. Eseguire inizialmente opportune semplificazioni, introdurre successivamente adeguati correttivi, effettuare approssimazioni (per citarne solo alcune) sono, infatti, operazioni intenzionalmente finalizzate a rendere matematicamente intelligibile un problema altrimenti intrattabile analiticamente (con i mezzi a disposizione) o la cui rappresentazione analitica risulta talmente laboriosa da rendere più conveniente l'adozione di rappresentazioni approssimate. Dall'altro, tuttavia, la comprensione concettuale di un fenomeno richiede la capacità di distinguerne gli aspetti fondamentali da quelli secondari. Secondo questa angolatura prospettica, l'idealizzazione può essere intesa come quella prassi epistemica che mette capo a equazioni contenenti unicamente le grandezze

fondamentali, prescindendo sia da quelle influenti, sia da quelle che, pur non determinando l'insorgere del fenomeno, ne possono influenzare il comportamento.

Benché, a discapito delle differenti intenzioni all'origine del processo idealizzante, si approdi generalmente alle medesime equazioni (come attesta l'esempio del pendolo matematico), diverso è il modo in cui queste vengono intese: in un caso come pragmaticamente utili ma provvisorie, nell'altro come cognitivamente significative in quanto indicative – rispetto ad un agente intenzionale che le interpreta – del differente peso giocato dalle varie grandezze. Tale distinzione, in quanto ha luogo sul piano dell'attribuzione di significato, non pertiene, dunque, all'oggetto intenzionato ma alla modalità in cui l'oggetto viene intenzionato<sup>91</sup>. Di riflesso, sul piano propriamente didattico un simile punto di vista non impatta sulla selezione dei “tradizionali” contenuti oggetto di insegnamento (ovvero sul *che cosa* insegnare), bensì sul *come* della loro trasposizione, che deve essere opportunamente calibrata a seconda di cosa, di volta in volta, si voglia privilegiare: gli aspetti concettuali della disciplina oppure i vincoli imposti dal linguaggio formalizzato che li esprime.

---

<sup>91</sup> Si rammentino, a proposito, le parole del filosofo Edmund Husserl: «Va distinto l'oggetto nel modo in cui viene intenzionato e l'oggetto che viene intenzionato in quanto tale. In ogni atto, un oggetto viene “rappresentato” con queste o quelle determinazioni, e come tale esso potrà essere anche eventualmente il centro a cui mirano intenzioni di vario genere – intenzioni di giudizio, di sentimento, di desiderio, ecc. Pertanto in esse l'oggetto che viene intenzionato è lo stesso, mentre l'intenzione è diversa in ciascuna di esse, ogni rappresentazione intende l'oggetto in modo diverso». E. Husserl (1901), *Ricerche Logiche*, II, tr. it. a cura di G. Piana, Il Saggiatore, Milano, 2005, p. 158. Così commenta Paolo Spinicci: «ogni esperienza è esperienza di qualcosa in una determinata modalità, che varia con il variare della forma d'esperienza che è di volta in volta chiamata in causa - possiamo percepire, ricordare, immaginare, o anche soltanto pensare qualcosa. [...] Ciò che si dà nelle diverse forme della nostra esperienza [...] è un oggetto che può fungere da identico polo di riferimento per una molteplicità aperta di esperienze: possiamo percepire, ricordare o anche pensare ad una cosa o un evento che non smarrisce per questo la sua identità e permane lo stesso oggetto pur nel variare dei modi in cui ci si offre». Id., *Il mondo della vita e il problema della certezza*, CUEM, Milano, 2000, p. 167.

In ultimo, un breve cenno all'idealizzazione di oggetti fisici reali che, pur conducendo a modelli "atipici"<sup>92</sup> in quanto privi di conseguenze empiricamente verificabili, gioca un ruolo fondamentale nella modellazione matematica del moto, la quale presuppone necessariamente un'idealizzazione dei corpi materiali. Anche in questo caso le intenzioni sottese a tale tipo di prassi sono distinte ma complementari: da un lato la semplificazione dei calcoli matematici che comporta l'utilizzo di concetti limite quali punto materiale, corpo rigido, corpo perfettamente elastico, e così di seguito; dall'altro, il mettere in evidenza quali delle caratteristiche di un oggetto sono rilevanti rispetto a un determinato problema.

Assumiamo quale esempio paradigmatico il punto materiale, concetto totalmente contro intuitivo – letteralmente un ente geometrico adimensionale dotato di massa – ma estremamente utile in quanto consente di operare nello spazio cartesiano con i metodi della geometria analitica. A tale nozione – mediante cui si rappresenta un oggetto "intenzionandone" esclusivamente massa, posizione e velocità, prescindendo da tutte le altre caratteristiche – è possibile ricorrere per descrivere qualsiasi tipo di corpo in situazioni in cui le sue dimensioni non siano rilevanti rispetto al fenomeno in esame. Nel suo moto di rivoluzione attorno al Sole, la Terra, ad esempio, può essere assimilata a un punto materiale poiché il suo diametro è trascurabile rispetto alla lunghezza della sua orbita; non potrebbe invece esserlo se prendessimo in considerazione la sua rotazione o se intendessimo analizzarne la struttura interna. Ispirandoci liberamente all'*epoché* husserliana<sup>93</sup>, possiamo dunque concludere che, a livello metodologico, la messa tra parentesi delle dimensioni del corpo – anche se notevoli – è giustificata dal loro risultare *trascurabili* rispetto a quelle dell'ambiente in cui esso si muove e degli altri oggetti con cui interagisce.

---

<sup>92</sup> G. Boniolo, *Metodo e rappresentazioni del mondo: per un'altra filosofia della scienza*, Mondadori, Milano, 1999, p. 149.

<sup>93</sup> Per un approfondimento sulla nozione husserliana di *epoché* si rinvia a P. Spinicci, *Il mondo della vita e il problema della certezza*, cit., p. 119 e seg.

L'uso di idealizzazioni nella prassi scientifica rinvia così al problema dell'approssimazione, operazione complementare ma concettualmente distinta dalla prima che, all'interno del quadro teorico entro cui ci muoviamo, può essere declinata in un duplice senso: come approssimazione rispettivamente tra modello e modello (approssimazione matematica) e tra modello e sistema reale (approssimazione fisica).

## 6. *L'approssimazione*

L'approssimazione viene in genere ritenuta appannaggio esclusivo delle scienze empiriche, il prezzo da pagare per poter applicare la strumentazione matematica allo studio della realtà naturale. Secondo questa angolatura prospettica, tale operazione non interessa la fase di costruzione e sviluppo formale del modello, ma solamente le sue applicazioni: ai fisici sperimentali e non certo ai teorici compete, infatti, l'onere di effettuare opportune approssimazioni nel tentativo di validare empiricamente il modello che intendono testare.

Vi è, tuttavia, un altro tipo di approssimazione che esula da considerazioni riguardanti fatti empirici poiché viene operata a livello intrateorico, riducendo una legge complessa a una sua versione semplificata<sup>94</sup>. Di questo genere di approssimazione puramente matematica si occupa diffusamente l'articolo di Moulines *Approximate application of empirical theories: a general explication*<sup>95</sup>, nel quale l'autore spiega come tale operazione abbia luogo ogni qual volta – per facilitare i calcoli – una legge fisica viene approssimata con una semplificazione della funzione che la descrive. Il

---

<sup>94</sup> Ivi, p. 204.

<sup>95</sup> C.U. Moulines, «Approximate application of empirical theories: a general explication», *Erkenntnis*, 10 (2), 1976, pp. 201-227. Si veda inoltre M. Scriven, «The key property of physical laws: inaccuracy», in H. Feigl & G. Maxwell (a cura di), *Current issues in the philosophy of science*, Rinehart and Winston Holt, Rinehart and Winston, New York, 1961, pp. 91-101.



vantaggio che se ne ricava comporta, tuttavia, una perdita di generalità: le formulazioni semplificate delle leggi originali, per quanto estremamente utili, hanno infatti validità solamente entro un intervallo limitato, come dimostra il caso del pendolo semplice. A questo riguardo, abbiamo constatato come, per piccole oscillazioni, l'equazione della componente orizzontale del moto

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -mg \sin(\alpha) \cos(\alpha)$$

ovvero un'equazione differenziale non lineare non risolubile mediante funzioni elementari, sia ben approssimata dall'equazione nettamente più semplice

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\left(m \frac{g}{l}\right)x$$

Ne consegue come la legge del pendolo semplice

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

rappresenti un'approssimazione del caso generale valevole per ampiezze non necessariamente piccole

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{2^2} \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2^2} \left( \frac{3}{4} \right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \dots \right)$$

dove il moto del pendolo è comunque periodico ma non più armonico e il periodo dipende lievemente dall'ampiezza<sup>96</sup>. Ulteriori esempi di questo tipo ci sono offerti dalla legge di Galileo che approssima la legge di gravitazione universale così come dalla legge dei gas ideali – utilizzata per descrivere il comportamento dei gas reali in condizioni di pressioni non troppo elevate e di temperature non prossime alla temperatura di liquefazione del gas – di cui la più complessa equazione di Van der Waal<sup>97</sup> fornisce un'estensione.

Letta alla luce della visione modellistica<sup>98</sup>, questo tipo di approssimazione puramente matematica si configura come una peculiare relazione di similarità tra modelli della medesima teoria, o meglio, tra modelli di diverso grado di specificità appartenenti alla medesima famiglia. Tali considerazioni che pertengono alla fase teorico-costruttiva dello sviluppo dei modelli, se riferite alla loro funzione rappresentazionale, ci riconducono al secondo genere di approssimazione che implica l'esclusione di un perfetto accordo tra modello e sistema reale a favore – come osservato in precedenza – di una più debole relazione di somiglianza. Il rifiuto dell'isomorfismo si giustifica – secondo Giere – rammentando innanzitutto come non vi sia alcun diretto confronto tra modello e parte di mondo rappresentata: la validazione di modelli rappresentazionali completamente specificati passa, infatti, attraverso il confronto non con dati grezzi ma con modelli dei dati. Questo poiché i dati ricavati empiricamente o sperimentalmente non sono immediatamente utilizzabili dagli scienziati, ma richiedono, prima di venire analizzati, di essere opportunamente trattati<sup>99</sup>.

---

<sup>96</sup> Ivi, p. 204. Si veda inoltre P. A. Tipler, *Meccanica, onde, termodinamica*, cit., p. 455.

<sup>97</sup> L'equazione di Van der Waal  $\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$  si riduce alla legge dei gas ideali ponendo  $a=b=0$ . C.U. Moulines, «Approximate application of empirical theories: a general explication», cit., p. 204.

<sup>98</sup> Va tuttavia puntualizzato che, a differenza nostra, la nozione di modello a cui Moulines fa riferimento è quella genuinamente suppesiana. Ivi, p. 207.

<sup>99</sup> R. Giere, «Using Models to Represent Reality», cit., pp. 54-55.

Assumendo come filo conduttore l'articolo di Tod Harris *Data Models and the Acquisition and Manipulation of Data*<sup>100</sup>, cerchiamo di chiarire quanto accade nella metà inferiore della gerarchia di modelli ipotizzata inizialmente da Suppes, conformemente alla sua intenzione di considerare le teorie non in modo astratto, ma in connessione con i metodi di sperimentazione necessari per la loro validazione<sup>101</sup>. Avvalendoci di un esempio proposto da Harris, supponiamo di voler ricavare la traiettoria percorsa da un pianeta a partire dalle rilevazioni delle sue successive posizioni. A questo proposito si procede con una serie di ripetute osservazioni così da raccogliere una quantità sufficiente di dati, avendo cura di eliminare i valori anomali o non significativi, in quanto frutto di errori di diverso genere, imputabili a varie cause (procedure di misurazione, difetti del telescopio, condizioni atmosferiche non ottimali, ecc.). In ultimo, si rappresenta in un sistema di riferimento cartesiano la curva passante per i punti associati ai dati precedentemente scremati.

Queste due operazioni – definite rispettivamente «*data reduction*» e «*curve fitting*»<sup>102</sup> – consentono pertanto di trasformare l'iniziale insieme discreto in un percorso rappresentato da una curva piana continua, trasformazione che – per ovvi motivi – non può risolversi in una corrispondenza biunivoca tra i due domini, ma solamente in una corrispondenza parziale. La curva così ottenuta si configura quindi come un modello dei dati costruito grazie all'utilizzo di strumenti statistici in modo tale da risultare simile ai dati originali – e quindi, indirettamente, al fenomeno che intende rappresentare – secondo alcuni aspetti rilevanti<sup>103</sup>. Questa modalità di rappresentazione dei dati non è, tuttavia, l'unica opzione possibile; sono infatti disponibili diverse tecniche di modellazione dei dati a seconda delle similarità che, di volta in

---

<sup>100</sup> T. Harris, «Data Models and the Acquisition and Manipulation of Data», *Philosophy of Science*, 70 (5), 2003, pp. 1508–1517.

<sup>101</sup> P. Suppes, «Models of Data», cit. Si veda inoltre M.C. Galavotti, «On Patrik Suppes' philosophy of science», cit.

<sup>102</sup> T. Harris, «Data Models and the Acquisition and Manipulation of Data», cit., p. 1510.

<sup>103</sup> Ivi, p. 1511.

volta, si vogliono selezionare. In questo modo gli scienziati – sostiene Harris – possono scegliere di organizzare i dati di un particolare insieme in un istogramma piuttosto che in una curva in base a quali regolarità intendono porre maggiormente in evidenza, veicolando in questo modo certe informazioni a spese di altre che andranno perse.

Da questo quadro emerge chiaramente come, una volta esclusa per giustificate ragioni la possibilità di una perfetta coincidenza, i criteri secondo i quali giudicare l'adeguatezza dell'accordo tra modello e sistema reale possono essere fondamentalmente di due tipi. Nel primo caso la soglia di tolleranza dipende da quello che Thomas Kuhn definisce «ragionevole accordo»<sup>104</sup>, intendendo con ciò lo scarto tra previsioni teoriche e valori sperimentali considerato accettabile dagli scienziati, tenuto conto delle idealizzazioni e approssimazioni incorporate nei modelli nonché dei limiti di accuratezza delle misure. Si tratta, quindi, degli standard di precisione – diversi da settore a settore<sup>105</sup> – stabiliti e accettati dai membri di una comunità scientifica e soggetti, nel tempo, a continue revisioni apportate in seguito a progressi di tipo tecnologico, matematico e a svariati altri fattori. Di qui la principale funzione che Kuhn attribuisce alla misura nella pratica normale della scienza: migliorare il ragionevole accordo tra la teoria e i “fatti” (noi diremmo tra modelli rappresentazionali e modelli dei dati), obiettivo che richiede agli scienziati d'inventare tecniche sperimentali e apparati di misura sofisticati, di rimuovere, ove possibile, gli effetti

---

<sup>104</sup> T. S. Kuhn, «La funzione della misura nella scienza fisica moderna» in Id., *La tensione essenziale: cambiamenti e continuità nella scienza*, Einaudi, Torino, 1985, pp. 193-243, p. 200. Secondo Kuhn, la funzione della misura nella scienza normale è proprio quella di migliorare questo ragionevole accordo. Non esiste alcun criterio unanime nel stabilirlo: è diverso, infatti, nei vari settori e nell'ambito di ogni settore si modifica col tempo. Si pensi, ad esempio, alla deviazione di Mercurio rispetto alle previsioni fornite dalla teoria newtoniana: prima della formulazione della teoria relatività di Einstein che ne dà conto, essa rientrava nel ragionevole accordo stabilito dalla comunità scientifica sulla base del paradigma vigente.

<sup>105</sup> Ad esempio, in spettroscopia con accordo ragionevole s'intende un'uguaglianza di sei cifre decimali; nella teoria dei solidi sono sufficienti due cifre decimali, mentre in campo astronomico un simile accordo è da considerarsi utopico. *Ibidem*.

perturbativi, nonché di escogitare modi per stimare in maniera sempre più precisa quelli che non possono essere eliminati<sup>106</sup>.

Nel secondo caso, invece, a stabilire i limiti entro cui un'approssimazione può definirsi soddisfacente sono, come avevamo già anticipato, gli scopi, teoretici o pragmatici, per i quali viene impiegato un modello. Se gli obiettivi sono di carattere esplicativo, anche modelli fortemente idealizzati possono essere giudicati adeguati poiché consentono di cogliere meglio, rispetto a quelli più dettagliati, il diverso peso delle variabili in gioco. Al contrario, se ad essere valutata è la capacità predittiva del modello in vista di possibili ricadute applicative, gli standard di precisione richiesti saranno maggiori data la necessità di agire direttamente sulla realtà controllandola. Anche in questi casi, tuttavia, è bene tenere presente il monito di Enrico Fermi «mai più precisione di quanto strettamente necessario»<sup>107</sup>, il quale ci ricorda come la nozione di precisione, accanto alla sua funzione di idea regolativa, possa assumere una valenza pragmatica se considerata relativamente al tipo di obiettivo che si intende perseguire.

Interpretando l'esortazione di Fermi alla luce di quanto emerso dalle precedenti considerazioni, possiamo dunque concludere come la misura “vera/esatta” in fisica sia una chimera di cui è bene liberarsi: da un lato perché a ogni misura è sempre associato un margine d'incertezza, dall'altro perché l'equazione concettuale “più esatto = migliore” non ha valore tautologico, ma è da valutarsi in relazione al contesto<sup>108</sup>.

---

<sup>106</sup> T. S. Kuhn, «La funzione della misura nella scienza fisica moderna», cit., in particolare pp. 208-209.

<sup>107</sup> Citazione in G. Tonzig, *Fondamenti di meccanica classica*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2011, p. 33.

<sup>108</sup> C.U. Moulines, «Approximate application of empirical theories: a general explication», cit., p. 205. Nella prassi scientifica, qualora lo scarto tra una previsione più corretta e una approssimata non sia determinante rispetto all'obiettivo prestabilito, la scelta ricade sul modello matematicamente meno oneroso sebbene meno “esatto”.

### 7. *Percezione di similarità, modellizzazione diretta, generalizzazione formale*

Da ultimo, vorremmo concludere fornendo qualche precisazione su ciò che Kuhn definisce «percezione della somiglianza ricavata dall'istruzione»<sup>109</sup>, componente chiave, secondo il filosofo, del processo di modellizzazione diretta di nuovi problemi a partire da problemi già risolti. In questo senso – osserva Giere – alcuni particolari modelli come l'oscillatore armonico, fungono da prototipi per la costruzione di altri modelli, ricoprendo così la funzione degli esemplari kuhniani, ovvero di «concrete soluzioni di rompicapo che, usate come modelli o come esempi, possono sostituire regole esplicite come base per la soluzione dei rimanenti rompicapo della scienza normale»<sup>110</sup>. Secondo l'autore, per fare scienza è quindi necessario acquisire la capacità di «vedere somiglianze tra problemi che appaiono diversi», poiché una volta rilevata l'analogia tra un nuovo problema e un problema precedentemente risolto, ne consegue la possibilità di riproporre il primo nei termini del secondo. Scrive Kuhn:

Questa capacità di riconoscere somiglianze approvate dal gruppo è, credo, la cosa più importante che gli studenti imparano nel risolvere i problemi sia con carta e matita che in adatti laboratori. Nel corso del loro addestramento vengono preparati per loro un gran numero di questi esempi, e gli studenti che si preparano per una certa specializzazione fanno in generale quasi sempre gli stessi, per esempio il piano inclinato, il pendolo conico, le ellissi di Keplero, e così via. Questi esempi concreti con le loro soluzioni sono ciò cui mi sono precedentemente riferito come casi esemplari, esempi standard di una comunità. [...]. L'acquisizione di un arsenale di casi esemplari [...] è parte integrante del processo con il quale uno studente acquista accesso ai risultati conoscitivi del suo gruppo disciplinare<sup>111</sup>.

---

<sup>109</sup> T. S. Kuhn, «Nuove riflessioni sui paradigmi», in *La tensione essenziale: cambiamenti e continuità nella scienza*, cit., pp. 321-350, p. 349.

<sup>110</sup> Tale definizione compare nel *Poscritto* del 1969 a *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. Id., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., p. 212.

<sup>111</sup> Ivi, p. 336.

I casi esemplari, sostiene il filosofo e storico della scienza, sono dunque funzionali all'acquisizione della capacità di raggruppare problemi, oggetti, situazioni in «insiemi simili» che sono «primitivi» nel senso di psicologicamente e logicamente antecedenti all'esplicitazione dei criteri in base ai quali è avvenuto il raggruppamento stesso. E che tale abilità richieda un preciso addestramento discende direttamente dal fatto che ogni mutamento di paradigma impone nuove relazioni di somiglianza, le quali, pertanto, non possono definirsi neutre rispetto ai quadri categoriali secondo cui viene interpretata la realtà. In questo senso, il paradigma della meccanica newtoniana insegna allo scienziato che vi aderisce a valutare come simili – e quindi a riunire nella medesima classe – fenomeni che il paradigma aristotelico manteneva assolutamente distinti in quanto apparentemente differenti<sup>112</sup>. A partire da queste considerazioni cercheremo ora di coniugare tale aspetto della riflessione kuhniana con la concezione intenzionale della rappresentazione scientifica sostenuta da Giere, riferendoci in particolare all'esempio dell'oscillatore armonico.

Giere ritiene che l'esempio relativo alla molla e quello relativo al pendolo non debbano essere considerati semplicemente casi particolari di una relazione generale, poiché solo mediante «un'assennata approssimazione» a piccoli angoli di oscillazione è possibile ridurre il secondo caso al primo. In particolare, «il passo dall'applicazione originale delle leggi di Newton a un pendolo bi-dimensionale a una versione a una dimensione non è un fatto di pura deduzione matematica o logica»<sup>113</sup>, ovvero non è un passaggio che segue necessariamente da come il problema è stato formalmente impostato. Il punto sta nell'effettuare un'approssimazione assennata nel senso di conforme all'esigenza specifica di trattare una situazione nuova come una

---

<sup>112</sup> Lo scienziato newtoniano riconosce, infatti, pendolo, piano inclinato e quiete come esempi della formula « $f=ma$ ». R. Lanfredini, «Da una teoria della scienza a una teoria della conoscenza: l'ultimo Kuhn», in C. Sinigaglia, R. Lanfredini, G. Irzik, «Discussione su "Dogma contro critica" di Thomas S. Kuhn», *Iride*, 3, 2000, pp. 625-645, in particolare pp. 634-635.

<sup>113</sup> R. Giere, *Spiegare la scienza*, cit., p. 120.

già precedentemente incontrata, strategia questa che si fonda sul riconoscimento di nessi di somiglianza.

Ora, tra il moto bidimensionale con traiettoria circolare del pendolo e quello rettilineo e unidimensionale della molla non vi è alcuna somiglianza esplicita, una somiglianza, per così dire, che chiunque potrebbe cogliere, ma solo una similarità potenziale che può essere rilevata esclusivamente leggendo i fenomeni alla luce delle regole che il paradigma newtoniano proietta su di loro. Affinché una “dissimilarità attuale” si tramuti in una “similarità attuale” risulta pertanto determinante la presenza di un agente intenzionale il quale, disponendosi all’interno di un determinato paradigma<sup>114</sup>, intraveda una somiglianza potenziale che lo induca a compiere la riduzione a piccoli angoli di oscillazione al fine di ricondurre un problema nuovo e più complesso a uno più semplice di cui si conosce già la soluzione.

L’abilità nel riconoscere somiglianze condivise dalla comunità scientifica di riferimento si traduce così nel saper individuare analogie formali<sup>115</sup> tra sistemi fisici differenti come nel caso del pendolo e della molla, entrambi esempi di sistemi meccanici oscillanti che differiscono solamente per il tipo di forza agente, quella di gravità nel primo caso e quella elastica nel secondo. Alla più comune generalizzazione empirica su base induttiva si affianca così una generalizzazione di tipo formale, la quale si configura come un nuovo tipo di prassi epistemica basata sul riconoscimento di schemi astratti comuni a differenti fenomeni che sopravvivono alle loro rappresentazioni idealizzate.

Chiarito come il complesso e articolato rapporto che sussiste tra teorizzazione fisica e mondo dei fenomeni richieda necessariamente l’azione

---

<sup>114</sup> Pendolo e molla sono, infatti, simili solo se li leggo alla luce del paradigma newtoniano; la loro somiglianza, di fatti, è di tipo epistemico non percettivo .

<sup>115</sup> Per un approfondimento sul concetto di analogia formale si rinvia a M. Hesse, *Models and analogies in science*, cit.; A. Strumia, «Verso una teoria dell’analogia. Analogia e astrazione nelle scienze», *Emmeciquadro*, 6, 1999, disponibile all’indirizzo Internet: [http://emmeciquadro.euresis.org/mc2/06/mc2\\_06\\_strumia\\_teoriana-analogia.pdf](http://emmeciquadro.euresis.org/mc2/06/mc2_06_strumia_teoriana-analogia.pdf)



mediatrice di modelli rappresentazionali, occorre ora interrogarsi sulle specifiche condizioni di insegnamento e apprendimento della disciplina, affinché divenga innanzitutto disponibile come forma di cultura capace di orientare le nuove generazioni in un mondo sempre più influenzato dalla scienza e dalla tecnologia. Nel seguente capitolo ci concentreremo, pertanto, sulle difficoltà che coagulano intorno alla trasposizione epistemologicamente adeguata e pedagogicamente accessibile della discrepanza tra l'immagine scientifica della realtà e la sua immagine manifesta<sup>116</sup>.

---

<sup>116</sup> Sul rapporto tra “immagine scientifica” e “immagine manifesta” si veda W. Sellars, *La filosofia e l'immagine scientifica dell'uomo*, Armando, Roma, 2007.



# *La Fisica come Savoir à Enseigner:*

*una riflessione sulle condizioni di possibilità*

*di una trasposizione didattica*

*epistemologicamente e pedagogicamente fondata*

## *1. La fisica matematizzata: per una trasposizione epistemologicamente e pedagogicamente fondata*

Per quanto il passaggio dalla vecchia alla nuova fisica sia sovente stigmatizzato dalla celeberrima metafora galileiana del gran libro della natura scritto in caratteri matematici<sup>1</sup>, riteniamo tuttavia che, alla luce di quanto emerso nel capito precedente, sia opportuno affiancarle in questa sua funzione di spartiacque un passo meno noto di Evangelista Torricelli<sup>2</sup>, così da completare la cornice concettuale entro cui s'inscrive la scienza moderna.

---

<sup>1</sup> «La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto». G. Galilei (1623), *Il Saggiatore*, a cura di L. Sosio, Feltrinelli, Milano, 1979, p. 232.

<sup>2</sup> Evangelista Torricelli, considerato uno tra i più promettenti e dotati discepoli di Galilei, gli successe nell'incarico di matematico e filosofo del granduca di Toscana. A lui si deve, tra gli altri innumerevoli contributi, la dimostrazione della possibilità del vuoto in natura.

Nella lettera del 10 febbraio 1646 indirizzata a un altro matematico discepolo di Galilei, il cardinale romano Michelangelo Ricci, Torricelli sostiene quanto segue:

Che i principii della dottrina *de motu* siano veri o falsi a me importa pochissimo. Poiché, se non son veri, fingasi che sian veri conforme abbiamo supposto, e poi prendansi tutte le altre specolazioni derivate da essi principii, non come cose miste, ma pure geometriche. Io fingo o suppongo che qualche corpo o punto si muova all'ingiù et all'insù con la nota proporzione et horizontalmente con moto equabile. Quando questo sia io dico che seguirà tutto quello che ha detto il Galileo et io ancora. Se poi le palle di piombo, di ferro, di pietra non osservano quella supposta proporzione, suo danno, noi diremo che non parliamo di esse<sup>3</sup>.

Le leggi geometriche, parafrasando Torricelli, regolano il comportamento di enti geometrici e la loro “verità” coincide senza residui con la correttezza della dimostrazione da cui derivano; se poi nella loro applicazione allo studio di corpi reali dovessero rivelarsi “false” è appunto perché esse non parlano di palle di piombo, di ferro o di pietra, ma di oggetti ideali da cui quelli reali differiscono in modo consistente. Ecco quindi i due capisaldi della scienza moderna: la scelta della matematica come linguaggio con cui indagare la natura e l'accettazione dei vincoli che essa impone; la distinzione e relativa indipendenza tra il piano teorico-ideale e il piano empirico-reale, nonché il problema del loro raccordo.

Di qui discende un problema che sembra (apparentemente) insanabile: le leggi matematiche che di per sé sono vere, se riferite al mondo diventano false; e allora come non dare ragione all'aristotelico Simplicio e negare la possibilità di indagare matematicamente la realtà? D'altro canto, scrive il filosofo Jacopo Mazzoni, «non vi è nessun altro problema che abbia dato luogo a più nobili e più belle speculazioni [...] del problema se sia opportuno o no l'uso della matematica nella scienza fisica come strumento e

---

<sup>3</sup> Citato in A. Guerreggio, *15 grandi idee matematiche che hanno cambiato la storia*, Mondadori, Milano, 2013, p. 48.

termine mediano di dimostrazione; in altre parole se ciò ci procura vantaggio o sia al contrario dannoso e nocivo»<sup>4</sup>.

A distanza di secoli, le parole proferite dal collega di Galilei in merito alla disputa tra Platone e Aristotele sulla legittimità della matematizzazione della fisica conservano un profondo valore – epistemologico e pedagogico – ed un indiscusso fascino, sebbene i confini entro cui s'inscrive la questione<sup>5</sup> siano inevitabilmente mutati. Alla luce degli sviluppi attuali della disciplina, non sono i vantaggi provenienti da un simile approccio a destare perplessità, bensì la ragione di tale successo, che il fisico premio Nobel Eugen Wigner nel saggio *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences* non esita a definire «irragionevole», invitandoci a considerarlo come «la legge empirica dell'epistemologia»<sup>6</sup>.

Sebbene un approfondimento in questa direzione esuli dagli intenti di questo lavoro, il riferimento a tale problematica epistemologica è d'obbligo per le profonde implicazioni che riveste sul piano pedagogico-didattico, implicazioni purtroppo spesso sconosciute a entrambi gli attori – docenti e soggetti in formazione – coinvolti nel processo di insegnamento-apprendimento. In ambito scolastico, infatti, la controversa questione dell'efficacia – irragionevole se ci schieriamo con Wigner oppure ragionevole, se aderiamo alla posizione difesa da Saunders Mac Lane<sup>7</sup> – della matematica nelle scienze empiriche non costituisce materia di discussione: se ai tempi di Galileo la matematizzazione della fisica animava

---

<sup>4</sup> J. Mazzoni, cit. in A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 233.

<sup>5</sup> Formulazione un po' generica per indicare anche tutta la serie di problemi connessi alle nuove prassi epistemiche, le nuove forme della conoscenza scientifica.

<sup>6</sup> E. Wigner, «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences», in *Symmetries and Reflections*, Indiana university Press, Bloomington, 1970, pp. 222-237, p. 233. Scrive il fisico: «Il miracolo dell'appropriatezza del linguaggio della matematica per la formulazione delle leggi della fisica è un meraviglioso regalo che non comprendiamo né meritiamo. Dovremmo essere riconoscenti per questo e sperare che rimanga valido nelle ricerche future e che si estenda, nel bene e nel male, con nostro piacere, sebbene probabilmente anche con nostra perplessità, ad ampie branche del sapere». Ivi, p. 237.

<sup>7</sup> S. Mac Lane, «The Reasonable Effectiveness of Mathematical Reasoning», in R. Mickens (a cura di), *Mathematics and Science*, World Scientific, Singapore, 1990, pp. 115-121.

il dibattito tra platonici e aristotelici, ai giorni nostri nessuno studente si sognerebbe di mettere in dubbio tale felice connubio. Siffatta incondizionata fiducia non deriva, tuttavia, da una maturata consapevolezza del “come” la matematica effettivamente interviene nell’indagine della realtà naturale, ma si pone al pari di un assioma di per sé autoevidente, di una verità categorica che non abbisogna di ulteriori giustificazioni<sup>8</sup>. L’inabitudine ad interrogarsi sul processo di matematizzazione delle scienze trasforma così un’importante conquista dell’intelligenza umana in un assunto implicito, in una sorta di “necessità di fatto” di cui si fa tacitamente depositaria l’educazione manualistica, responsabile, secondo Dario Antiseri<sup>9</sup>, di veicolare un’immagine astorica e ap problematica della scienza che finisce per alimentare convinzioni ingenue sulla natura, sul metodo e sull’acquisizione della conoscenza scientifica.

A questo proposito ricordiamo in particolare l’articolo di Horst P. Schecker citato nel primo capitolo, di cui ora ripercorreremo alcuni passaggi salienti per discuterli alla luce dell’ipotesi che si è andata sin qui delineando. Indagando la “matrice di comprensione” (*matrix of understanding*) della meccanica classica in studenti della secondaria di secondo grado tra i 16 e i 19 anni di età, Schecker individua alcune cornici concettuali (*frameworks of thinking*) ricorrenti – simili nella loro funzione alle teorie cornice ipotizzate da Vosniadou – così sintetizzabili: gli studenti concepiscono come concrete e reali le situazioni idealizzate ed astratte cui fanno riferimento i problemi di fisica; riconoscono quale compito principale della fisica la spiegazione di singole esperienze; riferiscono le leggi fisiche esclusivamente a “mondi-laboratorio” ideali, ritenendole quindi non realmente significative per interpretare le esperienze quotidiane.

---

<sup>8</sup> A questo proposito, si rammenti come venivano considerati gli assiomi euclidei prima dell’avvento delle geometrie non euclidee e della successiva svolta formalista in ambito matematico.

<sup>9</sup> D. Antiseri, *Didattica delle scienze*, Armando Editore, Roma, 2000.

Dalla ricerca si evince pertanto la difficoltà cognitiva, da parte degli studenti, di articolare “fini” e “mezzi” della fisica, disciplina che si propone d’indagare e comprendere la realtà utilizzando, tuttavia, modelli altamente idealizzati che con quest’ultima, almeno in apparenza, hanno ben poco a che fare. Per una significativa minoranza (circa il 17%)<sup>10</sup> ciò si traduce nel totale rifiuto di trattare con casi ideali, opzione motivata sulla base dell’inutilità di considerare qualcosa che non esiste come, ad esempio, i moti privi di attrito, in quanto non esemplificativi dell’effettivo comportamento dei corpi reali. Nella maggior parte degli studenti, tuttavia, tale difficoltà si palesa non in un’esplicita opposizione al tipo di metodo, bensì nell’inadeguatezza della giustificazione fornita a suo supporto: in un caso banalmente pragmatica – i casi ideali consentono di semplificare massicciamente i calcoli («rendono tutto più facile») – nell’altro connessa alla scissione, sulla base di una loro presunta incompatibilità, tra il mondo reale e il mondo ideale di cui tratta la fisica («non c’è bisogno che mi riferisca alla realtà, sono semplicemente interessato alla fisica»).

In merito a quest’ultima posizione, un’ulteriore variazione sul tema è inoltre offerta dai risultati dell’indagine esplorativa condotta durante i laboratori di fisica afferenti al corso di laurea in Scienze della Formazione Primaria<sup>11</sup>, dai quali emerge una radicata e diffusa confusione circa il peculiare rapporto che i sistemi fisici reali intrattengono con le loro rappresentazioni idealizzate. Privi di un’idea precisa sul ruolo e sulla funzione dei modelli ma senza sostanzialmente mettere in dubbio il loro utilizzo, la maggioranza degli studenti, non sapendo come giustificare il loro impiego nello studio dei fenomeni naturali, si appellava a una sorta di principio di autorità: “se i fisici si comportano così e ottengono risultati vuol dire che è giusto”.

---

<sup>10</sup> H. P. Schecker, «The paradigmatic change in mechanics: Implications of historical processes for physics education», cit., pp. 74-75. A questo proposito si rammenti quanto esposto nel primo capitolo.

<sup>11</sup> Per maggiori dettagli si rinvia al quinto paragrafo del primo capitolo.

Simili risposte lasciano chiaramente intuire come il ragionare su situazioni ideali non sia frutto di un consapevole accordo circa il particolare punto di vista da cui è opportuno guardare il mondo in funzione del raggiungimento di un determinato obiettivo, ma venga assunto dai più come un collaudato assioma del metodo scientifico di cui, in definitiva, non è necessario rendere conto. In quanto disgiunta dalla consapevolezza delle ragioni profonde che la sorreggono, questa accettazione passiva della logica dell'agire scientifico, lungi dal condurre alla formazione di abiti mentali astratti e durevoli così come vorrebbe Dewey<sup>12</sup>, finisce per risolversi in un'abitudine irriflessa<sup>13</sup>, priva di una sua interna *ratio*. Al contrario, una reale comprensione della *forma mentis* del fisico richiede la condivisione del suo peculiare modo di vedere il mondo e, pertanto, anche del sistema di assunzioni consolidate e spesso tacite che ne sono alla base<sup>14</sup>.

Di qui l'inevitabile richiamo alla nozione kuhniana di paradigma come «costellazione di credenze condivise da un gruppo»<sup>15</sup>, riflesso di una particolare *Weltanschauung* che vincola, rendendoli convergenti, i giudizi stipulati da una certa comunità di studiosi. L'epistemologo descrive il passaggio da un paradigma a un altro come un mutamento globale di prospettiva, paragonabile a un riorientamento gestaltico, da cui sorge una nuova tradizione di scienza normale segnata da un diverso sguardo sul mondo, che rimane precluso a chiunque non vi venga adeguatamente educato. Ne consegue come l'adesione a paradigmi differenti sancisca, di fatto, l'incomunicabilità tra comunità scientifiche rivali a causa

---

<sup>12</sup> J. Dewey (1910), *Come pensiamo*, La Nuova Italia, Firenze 1986.

<sup>13</sup> Il termine "abitudine" viene qui inteso in senso ordinario, non nell'accezione deweyana che ha invece una connotazione positiva. Sul rapporto tra abito e abitudine si veda M. Baldacci, *Trattato di pedagogia generale*, Carocci, Roma, 2012, in particolare p. 120 e seg.

<sup>14</sup> Ivi, p. 117.

<sup>15</sup> T. S. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., in particolare pp. 219-230. Su la concezione di paradigma in Kuhn si rinvia a M. Casamonti, «Kuhn, Polanyi e Wittgenstein sul significato: esemplari, conoscenza tacita e giochi linguistici», *Rivista di Storia della Filosofia*, 2, 1999, pp. 283-308. Per un'interpretazione dell'epistemologia kuhniana nell'ambito di una pedagogia dei saperi si rinvia a B. Martini, *Pedagogia dei saperi*, cit., in particolare pp. 106-112.



dell'incommensurabilità semantica tra i costrutti teorici rispettivamente adottati, i quali, per quanto espressi dai medesimi termini, assumono in realtà significati completamente diversi.

Emblematiche, a questo riguardo, risuonano le parole di Paolo Bozzi circa l'«apparente accordo» tra Galileo e i discepoli di Aristotele sui principi da adottare nell'indagine scientifica della natura. Da ambo le parti, nota il percettologo, si ammette, infatti, che «le scienze fisiche devono essere un complesso di fedeli descrizioni di *fatti presenti nell'esperienza*, e che – almeno in linea di principio – l'osservazione ha tutti i diritti sulla teoria, e la teoria tutti i doveri verso l'osservazione»<sup>16</sup>. In realtà, come ben sappiamo, tale «concordanza di vedute» è puramente illusoria; una volta compresi nel loro significato contestuale, gli ambigui enunciati che la presumono rivelano, al contrario, un radicale disaccordo su cosa si debba propriamente intendere con «fatti dell'esperienza», locuzione che in effetti ha subito un notevole slittamento semantico nel passaggio dal paradigma aristotelico a quello della nuova fisica. Per rendersi conto della natura di tale disaccordo Bozzi ci invita a considerare come, secondo Galileo, l'eliocentrismo sostenuto da Copernico fosse perfettamente compatibile con i «fatti» (sperimentali), mentre per i peripatetici tale teoria risultasse assolutamente «incredibile» poiché «*si vede benissimo, osservando i fatti, che la terra sta ferma e che il sole percorre un arco nel cielo*»<sup>17</sup>.

Aderire a paradigmi diversi significa, pertanto, intendere diversamente le medesime cose poiché l'occhio che guarda è condizionato da una diversa «costellazione di credenze»; così, se Aristotele giudica la presenza di un mezzo resistente come essenziale al movimento in quanto sua condizione di possibilità, Galileo, al contrario, la ritiene un mero accidente, un impedimento al moto stesso che nel vuoto, invece, non subirebbe rallentamenti.

---

<sup>16</sup> P. Bozzi, «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», cit., p. 282.

<sup>17</sup> Ivi, p. 283.

All'interno della prospettiva kuhniana, la fiducia positivistica in uno sguardo "neutro" sulla realtà cede dunque il passo all'invito popperiano a considerare ogni osservazione come carica di teoria<sup>18</sup>, ovvero a conferire importanza non tanto ai fatti quanto alle loro possibili interpretazioni, derivanti da modi di vedere e di ragionare veicolati tacitamente attraverso la condivisione di casi esemplari, vale a dire di soluzioni di problemi concreti accettati come paradigmatici dalla comunità scientifica.

Trasposta sul piano didattico-educativo, tale posizione epistemologica ci induce ad avanzare la seguente conclusione: se docenti e studenti non sono sintonizzati sulla stessa visione del mondo non ci può essere spazio per un accordo razionalmente fondato quale premessa alla negoziazione di significati, ma solo una sudditanza intellettuale all'autorità di turno che esclude, di fatto, la possibilità di un apprendimento significativo e conseguentemente la formazione di abiti mentali aperti e critici. Avere sviluppato una certa abitudine alla modalità tradizionale con cui la scienza viene proposta e veicolata non significa ancora aver imparato a "vedere" il mondo secondo le regole che quel particolare tipo di sapere vi proietta: la consapevolezza del mutamento di paradigma, infatti, non sopravviene spontaneamente, quale diretta conseguenza dell'apprendimento dei contenuti scientifici insegnati. Per quanto si possa maturare una simile consapevolezza solo parallelamente all'acquisizione di specifici contenuti, il successo di tale operazione, tuttavia, non è a priori garantito, ma può essere

---

<sup>18</sup> Per quanto Popper e Kuhn divergano a proposito del metodo falsificazionista (e non solo) sostenuto dal primo, entrambi concordano nell'opporsi alla tesi neoempirista dell'indipendenza dell'osservazione dalla teoria, negando l'esistenza di un'osservazione pura e di un linguaggio osservativo neutro. Kuhn sostiene inoltre che a selezionare i fatti da osservare sia il paradigma in cui ci si inserisce. L'aderire a un dato paradigma piuttosto che a un altro muta infatti la gerarchia dei problemi verso cui viene indirizzata la ricerca così come le strategie di base accettate per la soluzione di problemi, le procedure di verifica sperimentale ammesse, nonché il modo in cui viene impostata la formazione dei futuri scienziati. G. Boniolo, P. Vidali, *Introduzione alla filosofia della scienza*, cit., pp. 37 e seg., a cui si rinvia per ulteriori approfondimenti.

più o meno favorito<sup>19</sup> dal *come* viene amministrata la loro trasposizione didattica.

A questo proposito, una breve digressione sulla classificazione dei tipi logici di apprendimento ipotizzata dall'antropologo e psicologo britannico Gregory Bateson<sup>20</sup> potrà aiutarci ad inquadrare meglio il discorso.

## 2. *Il lato allievo–sapere: le teorie cornice*

L'apprendimento, in linea generale, può essere inteso come una modificazione relativamente durevole e stabile del comportamento per effetto di un'esperienza solitamente ripetuta nel tempo<sup>21</sup>. Il processo apprenditivo non è lineare (per semplice accrescimento), bensì ricorsivo e circolare come puntualmente mette in evidenza Bateson, richiamandosi alla teoria dei tipi logici di Bertrand Russell, imperniata sull'idea di una gerarchia, in ordine crescente, di livelli logici fra concetti, predicati e simboli<sup>22</sup>. Categorizzando l'apprendimento sulla base del tipo logico di cambiamento di volta in volta in atto, lo studioso ne distingue quattro diversi livelli che ora illustreremo attraverso una sintetica schematizzazione consona ai nostri scopi.

Secondo la classificazione batesoniana, l'apprendimento di livello zero consiste nell'assimilazione di una specifica risposta ossia nell'acquisizione di conoscenze di tipo dichiarativo (“imparare che”); l'apprendimento di primo livello (proto-apprendimento) consta invece in una modificazione

---

<sup>19</sup> Per un'analisi critica della concezione dell'insegnamento come causa dell'apprendimento si veda E. Damiano, *La mediazione didattica: per una teoria dell'insegnamento*, cit., in particolare pp. 107-138.

<sup>20</sup> G. Bateson, *Verso un'ecologia della mente*, Adelphi, Milano, 2007. Per quanto concerne la teoria di Bateson ci rifaremo all'esposizione che ne offre Baldacci in Id., *Trattato di pedagogia generale*, cit., in particolare p. 131 e seg.

<sup>21</sup> Si veda, ad esempio, L. Anolli, P. Legrenzi, *Psicologia generale*, Il mulino, Bologna, 2012, p. 151 e seg.

<sup>22</sup> B. Russell (1903), *I Principi della Matematica*, Longanesi, Milano, 1988.

nella specificità della risposta a partire dai *feed-back* ricevuti dall'esperienza diretta e corrisponde all'apprendimento comunemente inteso. Ad essere apprese, in questo caso, sono conoscenze di tipo procedurale, ovvero "s'impara come" fare qualcosa sviluppando, in seguito ad un esercizio congruamente prolungato, un'abilità di un certo tipo.

L'apprendimento di secondo livello (deutero-apprendimento), sovraordinato al proto-apprendimento, concerne processi quali l'imparare ad apprendere e l'acquisizione di abitudini mentali o appercettive assimilabili a modi di vedere e di pensare che ricordano, per affinità concettuale, «gli abiti di pensiero svegli, attenti e profondi»<sup>23</sup> posti da Dewey a traguardo dell'educazione. In *Come pensiamo*<sup>24</sup> e, successivamente, in *Esperienza e educazione*<sup>25</sup> l'autore avverte, infatti, del duplice livello in cui si articola il processo educativo il quale – lungi dall'esaurirsi nell'apprensione di singoli contenuti – sottende la formazione collaterale di abitudini (mentali ed emotive) astratte e permanenti quale corredo cognitivo per fronteggiare le situazioni future<sup>26</sup>. Marcando la distanza tra l'apprendimento manifesto, rapido e superficiale e un apprendimento ad esso collaterale, di natura implicita, profondo e di lunga durata, la distinzione avanzata da Dewey collima ampiamente con quella formulata da Bateson secondo cui il deutero-apprendimento non si svilupperebbe in modo autonomo, bensì parallelamente agli apprendimenti di primo livello che ne rappresentano pertanto l'imprescindibile presupposto.

In ultimo – in corrispondenza del livello gerarchicamente più elevato della classifica – troviamo l'apprendimento tre che consiste in una modificazione

---

<sup>23</sup> J. Dewey, *Come pensiamo*, cit., p. 146.

<sup>24</sup> Ivi, p. 124.

<sup>25</sup> J. Dewey (1938), *Esperienza e educazione*, La Nuova Italia, Firenze 1996, p. 33.

<sup>26</sup> La teoria del curriculum di Dewey fornisce così una valida corroborazione all'ipotesi formulata da Baldacci in merito alla necessità di articolare il curriculum in diversi livelli logici corrispondenti ai diversi tipi di apprendimento evidenziati da Bateson. M. Baldacci, *Ripensare il curriculum: principi educativi e strategie didattiche*, Carocci, Roma, 2006, p. 86 e seg.

del processo di deutero-apprendimento lungo le dimensioni della rapidità e della flessibilità: s'impara, dunque, a formarsi più celermente nuove abitudini astratte nonché – quando occorre – a svincolarsene, in modo da guadagnare una certa plasticità cognitiva quale antidoto al rischio a cui espone l'apprendimento due (molto diffuso per i motivi sopra citati) di rimanere imbrigliati negli schemi di una certa mentalità, sia essa o meno legata a un qualche dominio del sapere. In questo senso, come asserisce Baldacci, l'apprendimento di terzo livello può essere assimilato a un «atteggiamento metacognitivo di carattere dominio-generale connesso alla propensione a riflettere sulle proprie attività cognitive»<sup>27</sup>.

Ispirandoci ai contributi di Dewey e di Bateson intendiamo ora rileggere la lezione kuhniana alla luce della distinzione dei tipi logici di apprendimento, con l'obiettivo di declinare in chiave pedagogica le questioni epistemologiche sollevate dal filosofo al fine da ricavarne qualche possibile orientamento per l'azione didattica.

La necessità di una simile integrazione, reclamata, a nostro avviso, dalla stessa natura pluridimensionale della problematica in esame, può essere così giustificata: se Kuhn, sulla base di un'analisi storico-critica dell'evoluzione della scienza, ci insegna che essa rappresenta il terreno di scontro tra paradigmi – vale a dire tra differenti visioni del mondo a cui si accede solo a mezzo di un'adeguata educazione – Bateson e Dewey ci supportano nella comprensione delle modalità della loro formazione, consentendoci di classificare la loro acquisizione tra gli apprendimenti di secondo livello. Condividere un paradigma significa, infatti, condividere oltre a un sistema di credenze anche una serie di casi esemplari che, tramandando in maniera tacita e implicita le prassi epistemiche validate dalla comunità scientifica in quel particolare momento, insegnano, al contempo, a vedere le cose secondo

---

<sup>27</sup> M. Baldacci, *Una scuola a misura d'alunno*, Torino, Utet, 2002, p. 126; su questo aspetto si veda inoltre Id., *Ripensare il curriculum*, cit., p. 99 e seg.

una certa *Gestalt* e ad attribuire loro determinati significati<sup>28</sup>. Non solo. Spostando l'attenzione dalla storia della scienza alle ricerche condotte all'interno del grande dominio dell'analisi dei saperi ingenui, riteniamo plausibile includere tra gli apprendimenti di secondo livello anche le teorie cornice ipotizzate da Vosniadou, ovvero quel sistema di presupposizioni di tipo ontologico ed epistemologico che, formandosi come corollari naturali dei proto-apprendimenti – generalmente non intenzionali o informali – in contesti di vita quotidiana, agiscono per lo più a livello irriflesso sfuggendo così a qualsiasi presa di coscienza.

Avanzando un parallelo con ciò che il filosofo Edmund Husserl definisce “mondo della vita”<sup>29</sup>, potremmo definire questo tipo di apprendimenti collaterali come l'universo tacito delle credenze che rappresentano lo sfondo comune nonché il presupposto implicito di ogni agire e di ogni possibile prassi, prescientifica e scientifica. Ora, queste teorie cornice sotto forma di abiti mentali deuterio-appresi possono condizionare le esperienze e gli apprendimenti futuri a seconda che si possieda o meno la consapevolezza necessaria per circoscriverne l'ambito di validità, consapevolezza che si annuncia innanzitutto nella capacità di riconoscere due distinti ordini di problemi celati sotto la dizione “fisica ingenua”<sup>30</sup>. Da un lato, il problema di un «mondo dell'esperienza che ha le sue forme e i suoi nessi strutturali», dove le cose sono effettivamente così come appaiono e in cui errori ed illusioni trovano adeguata spiegazione a partire dalle regole che governano

---

<sup>28</sup> A questo proposito si rammenti quanto emerso nel capitolo precedente, in particolare in riferimento al caso esemplare dell'oscillatore lineare.

<sup>29</sup> Questa interpretazione è di Paolo Spinicci. In questo senso il mondo della vita è per Husserl condizione trascendentale della prassi scientifica. Id., *Il mondo della vita e il problema della certezza*, cit., p. 147.

<sup>30</sup> Questi due problemi sono stati messi in luce da Giovanni Piana in un commento sul significato epistemologico delle ricerche condotte da Paolo Bozzi nell'ambito della fisica ingenua, intesa prevalentemente nel senso di “fisica fenomenologica”. G. Piana, *Intervento sul libro “Fisica ingenua” di Paolo Bozzi*, 1990, tenuto in occasione della pubblicazione di *Fisica ingenua* alla Casa della cultura di Milano il 21 novembre 1990, disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/epistemologia/87-intervento-sul-libro-qfisica-ingenuaq-di-paolo-bozzi>, pp. 6-7.

le stesse dinamiche percettive<sup>31</sup>. Dunque un mondo che, presentandosi secondo modi determinati di organizzazione e di articolazione<sup>32</sup>, consente la formazione di un primo complesso di concetti intuitivi. Dall'altro, il problema dello sviluppo, a partire da queste «concettualizzazioni primarie», di «concettualizzazioni di grado superiore» – i concetti scientifici – e di «nuovi metodi di costruzione dei concetti» che progressivamente si distanziano dall'immediatezza dell'esperienza fino a recidere ogni nodo con essa<sup>33</sup>.

Alla luce di queste due problematiche vanno letti – a nostro avviso – gli errori sistematici relativi alla meccanica classica compiuti dagli studenti i quali, non avendo reale contezza di questi nuovi e controintuitivi metodi di

---

<sup>31</sup> Così scrive Giovanni Piana a proposito delle illusioni percettive: «i contenuti, non appena entrano in una scena percettiva, sono essi stessi risultati delle sintesi di cui sono il fondamento» ovvero «la qualità si modifica sotto l'azione delle tendenze e delle controtendenze che animano il campo percettivo. Questa modificazione può essere illustrata mediante quei casi estremi in cui la situazione percettiva si trova in un contrasto manifesto con la situazione oggettiva: segmenti che *appaiono* di lunghezza diversa mentre sono di eguali dimensioni, oppure segmenti *in realtà* rettilinei che *appaiono*, insieme ad una determinata disposizione di altri, ricurvi. Casi come questi potrebbero essere citati *proprio perché in essi non accade nulla di straordinario*. Fuori dell'ordinario è soltanto l'evidenza con la quale si mostra l'incidenza del contesto relazionale sui contenuti assoluti. Il divergere della situazione percettiva dalle determinazioni oggettive appare realmente significativa solo se facciamo notare che questo risultato si ottiene proprio perché i segmenti *sono* quello che sono – hanno, ad esempio, una lunghezza ben determinata e sono disposti proprio in quel modo. Perciò non si dovrebbe tanto contrapporre la situazione percettiva alla realtà delle cose quanto piuttosto mostrare che mutando il contesto le cose non *appaiono* più così. La questione dell'illusorietà può passare in secondo piano di fronte alla chiara esibizione della circostanza che caratterizza in generale ogni complesso percettivo: la parte «dipende» dall'intero; la qualità dalla relazione; e inversamente». G. Piana, *Elementi per una dottrina dell'esperienza*, cit., p. 70. E ancora Bozzi: «Non c'è alcun errore nel vedere le due linee di Muller-Lyer diverse, né nel vedere questo foglio grigio se posto su uno sfondo bianco più luminoso: "l'idea di errore nasce dai risultati ottenuti misurando"». P. Bozzi, *Vedere come. Commenti ai parr. 1-29 delle Osservazioni sulla filosofia della psicologia di Wittgenstein*, Guerini e Associati Milano, 1998, p. 69.

<sup>32</sup> P. Bozzi, «Fenomenologia del movimento e dinamica pregalileiana», cit., p. 379.

<sup>33</sup> Come lucidamente osserva Piana, ciò si ricollega al riconoscimento che «da un lato vi è la "fisica", dall'altro la "fenomenologia"; da un lato vi è il problema del processo fisico che conduce a questo o a quel risultato fenomenologico, dall'altro, vi è questo stesso risultato, considerato indipendentemente da quel processo, come un dato che ha un suo contenuto descrittivo che può essere reso esplicito nella molteplicità delle sue interconnessioni e nella complessità dei suoi rimandi di senso, restando interamente sul terreno delle apparenze fenomenologiche». <sup>33</sup> G. Piana, *La notte dei lampi: quattro saggi sulla filosofia dell'immaginazione*, Guerini e Associati, Milano, 1988, p. 160.

costruzione di conoscenza, rimangono inconsapevolmente ancorati, nell'interpretazione di tali concettualizzazioni di grado superiore, alle teorie cornice strutturatesi parallelamente all'esperienza pratico-percettiva del mondo e all'apprensione del linguaggio ordinario che ne conserva le tracce<sup>34</sup>. Ne consegue come, per poter disporre in modo appropriato di questi abiti mentali tacitamente deuteroappresi evitando di attribuire loro una validità universale, sia necessario un apprendimento di ordine logico superiore (di terzo livello appunto), molto complesso e cognitivamente oneroso, che consenta di guadagnare la flessibilità mentale necessaria per poter riconoscere l'utilità di una pluralità di prospettive e selezionare, di volta in volta, punti di vista adeguati ai differenti contesti.

Maturare una simile capacità risulta, tuttavia, un compito tutt'altro che semplice, principalmente per due ordini di motivi. Il primo, di natura endogena, concerne la forma stessa dei processi di deutero-apprendimento che, iniziando a strutturarsi precocemente e avendo carattere implicito, mettono capo ad abiti mentali pervicaci e difficili da modificare, i quali finiscono spesso per tramutarsi in vere e proprie gabbie mentali<sup>35</sup>. Il secondo, di natura esogena, è invece imputabile alla "pedagogia popolare"<sup>36</sup>, ovvero all'insieme di convinzioni ingenue sull'apprendimento

---

<sup>34</sup> Scrive Bozzi: «In svariate occasioni della vita la fisica ingenua prende forma e diventa un corpus più o meno coerente di conoscenze e aspettative che il linguaggio comune a suo modo esprime bene e in parte formalizza». Lo psicologo, infatti, non esita a definire linguaggio comune come «il linguaggio tecnico dell'esperienza percettiva» (Id, *Fisica ingenua*, cit., p. 177 e p. 301). Scrive Bozzi: «Mi è sempre sembrato non irragionevole credere che certi errori di interpretazione - quelli che si possono trovare nelle forme più elementari di costruzioni scientifiche, ad esempio - derivassero la loro plausibilità dall'evidenza immediata dei fatti, così come appaiono. La scienza antica, per la verità, è stata molto guardinga nei confronti di quelli che furono chiamati «gli inganni dei sensi»; ma in pratica è assai difficile rendersi perfettamente conto che tutta la nostra esperienza diretta del mondo esterno è regolata dalle stesse leggi alle quali «gli inganni dei sensi » obbediscono». Id., «Analisi del moto pendolare armonico», cit., p. 281.

<sup>35</sup> M. Baldacci, *Trattato di pedagogia generale*, cit., pp. 134-138.

<sup>36</sup> Tale costrutto, come sottolinea Baldacci, si deve allo psicologo statunitense Jerom Bruner, il quale ha ipotizzato che gli insegnati, nella propria attività didattica, siano orientati, per lo più inconsapevolmente, da una "pedagogia popolare", ovvero da un sapere ingenuo che si nutre di pre-giudizi intuitivi sul funzionamento della mente del discente, sul suo sviluppo, sulle modalità di apprendimento, ecc. Di questo è importante prendere atto



e sull'insegnamento che guida l'azione dei docenti spingendoli spesso a sottovalutare – come già ammoniva Dewey – queste forme di apprendimento collaterale implicito e di lungo periodo, a favore dell'acquisizione diretta e manifesta dei singoli contenuti trattati. Così si esprime Dewey in *Esperienza e educazione*:

Forse il maggiore degli errori pedagogici è di credere che un individuo impari soltanto quel dato particolare che studia in quel momento. L'*apprendimento collaterale*, la formazione di attitudini durature o di repulsioni, può essere e spesso è molto più importante. Codeste attitudini sono difatti ciò che conta veramente nel futuro<sup>37</sup>.

In opposizione a questo atteggiamento tanto pedagogicamente discutibile quanto generalmente diffuso, Baldacci rivendica la necessità di un mutamento di paradigma formativo, attuabile *in primis* essenzializzando il «curricolo 1»<sup>38</sup> – corrispondente al proto-apprendimento e relativo all'assimilazione di conoscenze e abilità legate ai vari saperi curricolari – per conferire rilievo al «curricolo 2» (corrispondente al deutero-apprendimento), ovvero agli effetti formativi a lungo termine che la scuola

---

poiché mette in luce come non siano le teorie pedagogiche razionalmente formulate a rappresentare la fonte da cui il docente attinge nella sua prassi quotidiana d'insegnamento, bensì un insieme di assunti impliciti ed intuitivi, in parte di senso comune e in parte dovuti all'esperienza personale e professionale del docente. Data la pervicacia di questo abito mentale, la soluzione proposta da Bruner non è la completa sostituzione di questo sistema di credenze, ma più realisticamente la sua modificazione. In questo senso si può affermare, come sostiene Baldacci, che la teoria non si riferisce direttamente alla prassi, ma lo fa mediatamente, per mezzo di modelli educativi, che assolvono la funzione di concettualizzare, epurare, correggere e raffinare alcune delle comuni intuizioni sviluppate dai docenti. Esplicitando l'implicito e sottoponendolo al vaglio critico della ragione, il «“vero” teorico di pedagogia» può così efficacemente orientare decisioni e pratiche quotidiane degli educatori sul campo. M. Baldacci, «Teoria, prassi e “modello” in pedagogia. Un'interpretazione della prospettiva problematicista», *Education Sciences & Society*, anno 1, 1, 2010, pp. 65-76. Si veda inoltre Id., *La dimensione metodologica del curricolo: il modello del metodo didattico*, Franco Angeli, Milano, 2010.

<sup>37</sup> J. Dewey, *Esperienza e educazione*, cit., p. 33.

<sup>38</sup> Tale distinzione prende forma proiettando sul curricolo la struttura logica degli apprendimenti ipotizzata da Bateson. La correlazione tra i livelli del curricolo e i livelli logici dell'apprendimento è trattata in M. Baldacci, *Ripensare il curricolo*, cit., p. 86 e seg.; Id., M. Baldacci, «Il curricolo e i suoi livelli logici», in L. Binanti e D. Ria (a cura di), *La ricerca educativa e formativa in Italia oggi*, Anicia, Roma 2010, pp. 17-25.

deve produrre, in riferimento ai quali si può appropriatamente parlare di «educazione intellettuale»<sup>39</sup>. Scrive Baldacci:

Di fronte all'obsolescenza delle conoscenze e al loro decadimento nella memoria dell'individuo, sta la persistenza degli abiti mentali. Quando ci si è dimenticati dei contenuti appresi a scuola, o questi sono ormai superati, ci resta però il guardaroba mentale che la scuola ci ha foggiato. Ed è tale guardaroba che, se adeguatamente conformato, ci può permettere di continuare ad apprendere per tutta la vita<sup>40</sup>.

Ciò tuttavia non basta. Il passaggio dalla testa piena alla testa ben fatta – per dirla con Morin<sup>41</sup> – è condizione necessaria ma non sufficiente a garantire lo sviluppo di una «mente proteiforme» intrinsecamente flessibile<sup>42</sup>, non cristallizzata negli schemi di un unico paradigma, ma capace di individuarne le possibili alternative nonché di aderirvi liberamente sulla base di una scelta razionale, funzionale a precise esigenze. La capacità di svincolarsi da un determinato paradigma esige, infatti, rispetto alla sua preliminare acquisizione, un salto logico che si configura come una presa di coscienza delle condizioni e dei limiti di validità cui è soggetta qualsiasi “rappresentazione del mondo”<sup>43</sup>.

---

<sup>39</sup> Sulla distinzione tra educazione e istruzione si veda M. Baldacci, *Trattato di pedagogia generale*, cit., pp. 267-268; Sull'educazione intellettuale come finalità educativa si veda Ivi, p. 315 e seg. Secondo Baldacci il carattere collaterale dell'apprendimento di secondo livello attesta chiaramente che non può darsi educazione intellettuale indipendentemente dai processi d'istruzione. Essa è «annidata in tali processi», ma è il modo di fare istruzione che di fatto la produce; in altri termini, è il tenore della trasposizione didattica dei saperi che si pone come vincolo alla possibilità di realizzare un'educazione intellettuale di qualità. «Il curriculum e i suoi livelli logici», in L. Binanti e D. Ria (a cura di), *La ricerca educativa e formativa in Italia oggi*, cit., p. 19 e seg. In proposito si veda anche Id., *Per un'idea di scuola. Istruzione, lavoro e democrazia*, Franco Angeli, Milano 2014, p. 29 e seg.

<sup>40</sup> M. Baldacci, «Il curriculum e i suoi livelli logici», in L. Binanti e D. Ria (a cura di), *La ricerca educativa e formativa in Italia oggi*, cit., p. 21.

<sup>41</sup> E. Morin, *La testa ben fatta*, cit.

<sup>42</sup> M. Baldacci, *Ripensare il curriculum*, cit, p. 112.

<sup>43</sup> Si pensi, ad esempio, al paradigma aristotelico rispetto a quello newtoniano e a quest'ultimo rispetto a quello inaugurato da Einstein. Del resto, anche negli studi sul cambiamento concettuale è emersa, al di là delle differenze specifiche, l'esigenza di interpretare tale processo non come rimozione ma, al contrario, come ampliamento del repertorio di modi alternativi di rappresentazione della realtà, funzionali a diversi contesti. Su questo punto si rimanda a quanto esposto a riguardo nel primo capitolo.

Siffatto salto logico consiste, da un lato, nella consapevolezza – cui si è accennato in precedenza – di come con il paradigma galileiano–newtoniano si apra un nuovo “gioco linguistico” che, inaugurando prassi epistemiche di un genere differente rispetto alle prassi ordinarie strettamente connesse ai bisogni del quotidiano e ai suoi orizzonti pratici, risponde a regole affatto diverse da quelle a cui ci ha abituato l’esperienza pratico–percettiva del mondo. Dall’altro, nel comprendere come sia necessario abbandonare il diffuso e abusato «luogo comune» che «assegna alla scienza un ruolo privilegiato per la scoperta della “verità”»<sup>44</sup>, a favore, suggerisce Marcello Cini, di un più cauto riconoscimento, maggiormente rispondente a ciò che la realtà storica attesta, secondo cui:

[...] non esistono strumenti e metodi oggettivi, validi in ogni tempo e in ogni luogo, per formulare una specie di manuale per l’uso dell’universo, continuamente aggiornato sulla base di una rappresentazione sempre più fedele e dettagliata delle sue parti e dei suoi ingranaggi. Esistono solo strumenti e metodi che ci permettono di selezionare, schematizzare e collegare fatti, esperienze, fenomeni all’interno di un quadro interpretativo coerente con un certo modo di vedere la realtà<sup>45</sup>.

Ciò premesso, si può quindi convenire che l’anticamera di una mente flessibile e duttile, non prigioniera di un unico punto di vista interpretativo ma capace di adottarne di diversi in base alle situazioni, sia una mente dotata di consapevolezza metaconcettuale<sup>46</sup>, vale a dire una mente incline a riflettere sulle proprie credenze e concezioni in vista di una loro contestualizzazione, ridefinizione ed eventuale modificazione in relazione a questioni di adeguatezza esplicativa.

---

<sup>44</sup> M. Mayer, «Immagini della scienza e dell’insegnamento» in M. Vicentini, M. Mayer (a cura di), *Didattica della fisica*, La nuova Italia, Scandicci, 1996, p. 134.

<sup>45</sup> M. Cini, *Un paradiso perduto. Dall’universo delle leggi naturali al mondo dei processi evolutivi*, Feltrinelli, Milano, 1994, p. 23.

<sup>46</sup> Nello specifico, la consapevolezza metaconcettuale si manifesta qui nella presa di coscienza che il paradigma a cui si aderisce orienta inevitabilmente l’interpretazione della realtà, che, tuttavia, non è l’unico possibile e che quindi non ha validità assoluta. In generale, sul ruolo della metacognizione nell’apprendimento si veda, ad esempio, B. Martini, *Didattiche disciplinari*, cit. pp. 202-215.

### *3. Il lato insegnante-sapere: la conoscenza tacita nei casi esemplari e le filosofie implicite*

Guardare alla problematicità dei rapporti tra fisica ingenua e fisica formale attraverso la lente privilegiata offerta dalla teoria dei tipi logici di apprendimento di Bateson aiuta a comprendere, almeno in parte, le ragioni delle difficoltà incontrate dagli studenti nello studio della fisica, soprattutto per quanto concerne l'acquisizione di abitudini mentali conformi alla sua logica intrinseca.

Collocando il cambio di paradigma tra gli apprendimenti di terzo livello si spiega di riflesso, infatti, la complessità della sua realizzazione. Ciò è ancor più vero se non ci si accontenta di un mero pseudo-apprendimento<sup>47</sup>, ma si mira alla costruzione di abiti mentali aperti, flessibili e critici, costruzione che reclama, pertanto, non una conversione da un sistema di credenze a un altro, ma un "scontro" tra paradigmi tale da condurre a una ridefinizione dei loro rispettivi ambiti di validità e, conseguentemente, alla possibilità di selezionare la rappresentazione della realtà più consona ai contesti e agli scopi nei e per i quali viene fatta agire. Non solo. Questo modo di inquadrare il problema consente di interpretare tanto le cornici concettuali esplicitate da Schecker attraverso l'analisi della matrici di comprensione degli studenti coinvolti nell'indagine, quanto i commenti dei partecipanti al laboratorio di fisica come "errori" di livello logico superiore rispetto alle generiche misconcezioni<sup>48</sup>, alla cui formazione e/o consolidamento possono dunque verosimilmente contribuire.

---

<sup>47</sup> Il caso esemplare di pseudoapprendimento, come sottolinea Baldacci, è costituito dalla conversione intesa come netto cambiamento di fede religiosa, politica oppure scientifica. Id., *Trattato di pedagogia generale*, cit., p. 131.

<sup>48</sup> Questa distinzione è legata al fatto che i primi pertengono al paradigma epistemologico e non semplicemente ai singoli concetti. A questo proposito Schecker sostiene che la consapevolezza del paradigma sia un prerequisito alla comprensione dei concetti, considerazione certamente condivisibile ma altrettanto problematica se consideriamo l'acquisizione del paradigma un apprendimento logico superiore che, come tale, non può avere luogo se non collateralmente all'acquisizione di singoli contenuti. D'altro canto,

Riferendo tale problema al disfunzionamento del sistema didattico inteso come sistema costituito dall'insieme delle relazioni *insegnante-allievo-sapere*, sposteremo ora l'attenzione dal sottosistema allievo-sapere al sottosistema insegnante-sapere, nel tentativo di porre in evidenza come anche al suo interno si possano annidare parte delle cause di una tale *impasse*. A questo proposito sono due, a nostro avviso, i punti su cui riflettere.

Il primo contempla il “come” della formazione scientifica dei futuri docenti che, per quanto concerne gli aspetti teorici, è affidata quasi esclusivamente a manuali di livello superiore, all'interno dei quali le teorie vengono per lo più presentate come famiglie correlate di modelli di diverso grado di specificità<sup>49</sup>. In questo senso, l'impostazione classica dei testi standard avalla la tesi kuhniana dell'importanza degli esemplari per l'educazione degli scienziati (intesi qui in senso lato, come coloro che studiano discipline scientifiche), i quali, proprio grazie allo «studio» di casi appositamente selezionati come, ad esempio, «l'oscillatore lineare», unitamente alla ricerca e alla «scoperta di quali tipi di sistemi reali rivelano un moto armonico [...], imparano a interpretare il simbolismo matematico e a identificare particolari esempi di quel simbolismo»<sup>50</sup>. Così facendo diviene loro accessibile quella parte di sapere incorporata nelle pratiche esperte che rimane nella mente ad un livello latente e potenziale, in quanto dapprima assimilata e successivamente mobilitata in maniera perlopiù irriflessiva.

Riformulando le considerazioni di Giere nel linguaggio della teoria batesoniana, possiamo dunque sostenere come, attraverso lo studio dei

---

concordiamo sul fatto che per comprendere a fondo alcuni concetti così fortemente controintuitivi sia necessaria la consapevolezza di muoversi all'interno di un paradigma affatto differente rispetto alle abitudini mentali consolidate attraverso l'esperienza pratico-percettiva del mondo. Di questo problema, che per la sua “paradossalità” sembra destinato a rimanere aperto, cercheremo, attraverso il presente lavoro, di mettere in luce i punti nevralgici nell'intento di contribuire ad una sua chiarificazione e quindi ad una sua migliore gestione.

<sup>49</sup> Si rammenti quanto esposto nel secondo capitolo sulla base delle osservazioni di Giere.

<sup>50</sup> R. Giere, *Spiegare la scienza*, cit., p. 125.

modelli esposti nei manuali, negli apprendisti fisici e nei futuri docenti si strutturano, collateralmente ai proto-apprendimenti, apprendimenti di secondo livello che includono l'acquisizione tacita e implicita di nuove tecniche e nuovi metodi di produzione di conoscenza riconosciuti come legittimi dalla comunità scientifica di riferimento. In questo modo essi imparano insieme all'arte della modellizzazione anche le condizioni di applicabilità di questi costrutti idealizzati ai fenomeni empirici che intendono rappresentare. In altri termini, essi acquistano – mediante un lungo e reiterato esercizio, esattamente come richiesto da qualsiasi tipo di deutero-apprendimento – una nuova «forma di dire il mondo»<sup>51</sup> e con essa anche i vincoli cui è soggetta.

Queste acquisizioni consolidate e stabili, rimangono solitamente implicite e invisibili, manifestandosi solamente nella prestazione competente. Una sorta appunto di *embedded knowledge*, insegnata e appresa ostensivamente, ma raramente oggetto di tematizzazione diretta. Con ciò non s'intende sostenere che generalmente l'agire del fisico sia caratterizzato da inconsapevolezza, ma solamente che prassi epistemiche quali idealizzazioni, approssimazioni o anche generalizzazioni di tipo formale, non divengono oggetto esplicito di riflessione da parte di coloro che abitualmente le utilizzano in quanto appartengono al genere di conoscenza veicolata attraverso gli esemplari. Particolarmente pertinente è in questo caso il richiamo di Kuhn al pensiero di Michael Polany, al quale riconosce di aver «sviluppato brillantemente un

---

<sup>51</sup> F. Cambi, «Scienza, scuola, museo: un "circolo virtuoso"», in F. Cambi, F. Gattini, (a cura di), *La scienza nella scuola e nel museo: percorsi di sperimentazione in classe e La scienza nella scuola e nel museo. Percorsi di sperimentazione in classe e al museo*, Roma, Armando, 2007, pp. 21-34, p. 22. Nel suo saggio sulle immagini della scienza, Franco Cambi opportunamente ricorda come la messa in discussione, sul piano epistemologico, del paradigma neopositivista debba riflettersi anche sul piano pedagogico-didattico, attraverso un insegnamento che sappia farsi carico e soprattutto fare tesoro della dimensione storica e sociale di questa disciplina. Alla scienza come immagine speculare del mondo, si deve pertanto sostituire una diversa immagine del lavoro scientifico dal volto «più critico, più aperto, più plurale, più flessibile, più dialettico», così che di questo particolare tipo di sapere alle nuove generazioni non venga tramandata solamente la dimensione tecnico-pratica, ma anche quella storico-culturale. *Ibidem*.

tema molto simile, argomentando che gran parte della riuscita di uno scienziato dipende da una “conoscenza tacita” cioè da una conoscenza che è stata acquisita attraverso la pratica e che non può venir articolata esplicitamente»<sup>52</sup>.

Semplificando e generalizzando, possiamo dunque fondatamente concludere come non solo nei novizi ma anche negli esperti vi siano conoscenze di tipo tacito e irriflesso – sebbene di natura e origine eterogenee – che, se non prese in debita considerazione, possono pregiudicare la costruzione di un terreno comune e condiviso di negoziazione di significati dal quale dipende, in larga misura, il buon esito dei processi di insegnamento-apprendimento<sup>53</sup>.

In questa direzione, un importante contributo può essere offerto, oltre che da studi di carattere psico-pedagogico, anche dalla riflessione storico-epistemologica che con sempre maggior urgenza viene invocata<sup>54</sup> da chi si occupa di educazione scientifica, ma che raramente trova un riscontro effettivo nella pratica didattica per ragioni in parte imputabili a lacune intrinseche ai *curricula* di studi a carattere scientifico. Non adeguatamente sensibilizzati a questioni di questo genere all'interno del loro percorso formativo universitario, buona parte dei docenti non ne riconosce l'importanza o comunque non le considera di pertinenza della propria disciplina d'insegnamento. Guidati dalla credenza ingenua che un'analisi critica della scienza e dei suoi risultati sia accessoria rispetto

---

<sup>52</sup> T. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., p. 66.

<sup>53</sup> Su questo importante aspetto ci soffermeremo nel prossimo paragrafo.

<sup>54</sup> Ad esempio, N. Grimellini Tomasini, G. Segrè (a cura di), *Conoscenze scientifiche: le rappresentazioni mentali degli studenti*, cit.; C. Fiorentini, «Immagini della scienza e competenze scientifiche», in F. Cambi, M. Piscitelli, *Complessità e narrazione*, Armando, Roma, 2005, pp. 85-114; F. Cambi, «Scienza, immagine della scienza e insegnamento delle scienze», in F. Cambi, L. Barsantini, D. Polverin (a cura di), *Formare alla scienza nella scuola secondaria di secondo grado*, pp. 15-24; M. Vicentini, M. Mayer (a cura di), *Didattica della fisica*, cit.; S. Vosniadou, «Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning», in G. M. Sinatra, P. R. Pintrich (a cura di), *Intentional conceptual change*, Lawrence Erlbaum Associates, London, 2003, pp. 377-406; F. Speranza, *Scritti di epistemologia della matematica*, Pitagora, Bologna, 1997; B. D'Amore, «Il ruolo dell'Epistemologia nella formazione degli insegnanti di Matematica nella scuola secondaria», *La matematica e la sua didattica*, 4, 2004, pp. 4-30.

all'acquisizione di abilità tecniche da spendere sul piano professionale<sup>55</sup>, buona parte degli insegnanti spesso trascura la dimensione formativa delle discipline scientifiche, sottovalutando così, ai fini della formazione integrale dell'uomo, la rilevanza di una visione comprensiva globale prospettica dei saperi, centrata sul loro valore conoscitivo<sup>56</sup>.

Tale rilevanza non era invece sfuggita a Francesco Speranza, il quale, nel corso di un intervento sul tema "Filosofie implicite nella pratica matematica"<sup>57</sup>, rivendica la necessità che la formazione dei matematici – e più in generale di un qualsiasi uomo di scienza – si nutra continuamente del confronto col dibattito storico-epistemologico per un duplice ordine di ragioni, suscettibili di essere estese anche al caso della fisica. In primo luogo, perché ridurre la disciplina a meri tecnicismi significa tradirne il senso<sup>58</sup> nonché impedirne una visione globale indispensabile per intrecciare

---

<sup>55</sup> Per un approfondimento inerente ai rapporti tra scienza e tecnica e i loro risvolti sul piano educativo si rinvia a B. Martini, *Formare ai saperi*, cit., pp. 57-62.

<sup>56</sup> Su questo punto si rinvia a B. Martini, *Pedagogia dei saperi*, cit., pp. 102-103, dove l'autrice commenta, nell'ambito di una pedagogia dei saperi, il differente atteggiamento, soprattutto per quanto concerne l'insegnamento, di umanisti e scienziati nei confronti dei classici. Sull'importanza del valore formativo della scienza insiste anche Cambi il quale ribadisce l'esigenza di una nuova didattica della scienza, «legata allo statuto attuale delle scienze e al bisogno di sviluppare, in ogni cittadino della "società complessa" e "dei saperi", una competenza non solo applicativa della scienza bensì anche una critica, che gli permetta di comprenderla come impresa sociale e cognitiva e di dominarla (almeno un po') nei suoi statuti anche logici». in F. Cambi, «Scienza, scuola, museo: un "circolo virtuoso"», cit., p. 28.

<sup>57</sup> L'intervento di Francesco Speranza a cui qui si fa riferimento ha avuto luogo durante l'incontro tenutosi a Parma nell'ottobre 1994. Qualche passaggio di questo intervento mai pubblicato è stato ricostruito, facendo riferimento ad appunti dell'epoca, da Carlo Veronesi nel suo articolo *Epistemologia e insegnamento della Matematica: l'eredità di Francesco Speranza*, consultabile all'indirizzo Internet: <http://matematica.unibocconi.it/articoli/epistemologia-e-insegnamento-della-matematica-leredit%C3%A0-di-francesco-speranza>.

<sup>58</sup> In questo Speranza ricorda, almeno in parte, il monito lanciato da Husserl ne *La crisi delle scienze europee* - opera scritta negli anni immediatamente precedenti la Seconda guerra mondiale ma apparsa postuma nel 1954 - a proposito dei pericoli derivanti dalla riduzione dell'impresa scientifica a mera tecnica, riduzione che, sostiene il filosofo, non può che incidere negativamente sul significato globale della stessa per l'uomo. E. Husserl (1954), *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale. Introduzione alla filosofia fenomenologica*, tr. E. Filippini, Il Saggiatore, Milano, 1983. Per ulteriori approfondimenti si rinvia a P. Spinicci, «Il mondo della vita e il problema della certezza. Riflessioni per una diversa lettura della "Crisi delle scienze europee"», in A. Ferrarin (a



connessioni con gli altri saperi. In secondo luogo, perché «in ogni attività intellettuale noi seguiamo delle *filosofie*, il più delle volte *implicite*: eredità di modi di pensare che risalgono al passato, spesso remoto»<sup>59</sup>. Come osserva Berta Martini<sup>60</sup>, infatti, sia la definizione dei programmi di insegnamento scolastici e universitari, sia le scelte compiute in ordine a *che cosa* e *come* insegnare risentono inevitabilmente di certe posizioni filosofiche implicite. In altre parole, l'immagine della scienza di cui sono portatori i singoli docenti, lungi dall'essere neutra rispetto al modello di sapere che intendono veicolare, orienta e guida scelte e pratiche didattiche, e questo a tutti i livelli d'istruzione. Dello stesso parere anche Maria Rosa Sciarretta e Rita Stilli, le quali, a commento delle ricerche condotte sulle rappresentazioni mentali degli studenti, concludono che «l'opzione epistemologica, al di là della consapevolezza che di essa si abbia, connota [...] in qualche misura, il taglio dell'intervento didattico e viene trasmessa, pur se implicita, ai discenti»<sup>61</sup>. Su questo punto insiste anche Michela Mayer<sup>62</sup> che, fornendo un dettagliato resoconto circa alcuni tra i principali luoghi comuni sulla scienza diffusi anche tra i docenti, contribuisce ad alimentare un emergente filone di studi primariamente centrati sull'analisi dell'epistemologia e delle convinzioni degli insegnanti, filone che, nel campo della matematica, Bruno D'Amore identifica come «Didattica C»<sup>63</sup>.

---

cura di), *Passive Synthesis and Life-World: sintesi passiva e mondo della vita*, ETS, Pisa, 2006; G. Piana, *Conversazioni sulla "Crisi delle scienze europee" di Husserl*, 2013, consultabile all'indirizzo Internet: [http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc\\_download/147-conversazioni-su-qla-crisi-delle-scienze-europee-di-husserl](http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc_download/147-conversazioni-su-qla-crisi-delle-scienze-europee-di-husserl).

<sup>59</sup> F. Speranza, «Contributi alla costruzione d'una filosofia non assolutista della matematica», in Id., *Scritti di epistemologia della matematica*, cit., p. 99.

<sup>60</sup> B. Martini, *Pedagogia dei saperi*, cit., p. 116. Per una lettura del costrutto di «filosofie implicite» in chiave pedagogica si rinvia a Ivi, pp. 112-118.

<sup>61</sup> N. Grimellini Tomasini, G. Segrè, *Conoscenze scientifiche: le rappresentazioni mentali degli studenti*, cit., pp. 6-7.

<sup>62</sup> M. Mayer, «Immagine della scienza e dell'insegnamento», in M. Vicentini, M. Mayer (a cura di), *Didattica della fisica*, cit., pp. 133-151.

<sup>63</sup> B. D'Amore, «Didattica della matematica "C"», in S. Sbaragli, (a cura di), *La matematica e la sua didattica, vent'anni di impegno*. Atti del Convegno Internazionale omonimo, Castel San Pietro Terme (Bo), 23 settembre 2006, Pitagora, Bologna, 2006, pp.

Nell'intento di favorire l'esplicitazione e conseguentemente la problematizzazione delle immagini implicite della scienza, che qui cercheremo di discutere anche alla luce di quanto emerso nei precedenti capitoli, Mayer ci invita a riflettere su come, tra i pregiudizi più radicati nella società e nella scuola, vi sia il mito illuministico della razionalità scientifica come fonte di verità categoriche. Riferita al caso della fisica, quest'immagine – sintetizzabile nell'equazione concettuale scientifico = oggettivo e quindi vero di per sé – riposa sulla convinzione che tale disciplina fornisce una copia fedele della realtà di cui è in grado di carpire l'intima struttura matematica. Dal punto di vista del *savoir savant*, ciò significa – come rileva la stessa studiosa – «confondere la mappa col territorio»<sup>64</sup>, e come questa confusione sia inaccettabile lo si evince dall'analisi condotta nel capitolo precedente dove, sulla scia delle considerazioni di Giere, si è cercato di mettere in luce quanto sia articolato e complesso il rapporto tra teoria e realtà, la cui connessione, tutt'altro che diretta, richiede appunto un'intera gerarchia di modelli.

Un simile pregiudizio non solo tradisce in senso epistemologico il sapere di cui si opera la trasposizione didattica, ma non consente, a chi ne è vittima, nemmeno il rispetto dei vincoli pedagogici che tale operazione impone: confondere una “caricatura” della realtà con la sua “fotografia”, per dirla con Guerreggio, impedisce infatti ai docenti di comprendere le difficoltà connesse all'assimilazione di un nuovo modo – quello scientifico – di vedere le cose, il quale di fatto richiede la «capacità di pensare, operare, parlare all'interno di una rappresentazione della realtà originale e a volte

---

93-96. Ispirandosi al triangolo della didattica e ai suoi tre poli D'Amore distingue un triplice modo di vedere la didattica della matematica. *In primis* abbiamo la Didattica A che si concentra sull'insegnamento e quindi sul sapere, sui suoi contenuti e sulla loro divulgazione; *in secundis* la Didattica B, centrata sull'allievo e dunque sui motivi dei successi e degli insuccessi dell'apprendimento; in ultimo la Didattica C che si occupa degli insegnanti analizzandone l'epistemologia, la formazione e le convinzioni.

<sup>64</sup> M. Mayer, «Immagini della scienza e dell'insegnamento», in M. Vicentini, M. Mayer (a cura di), *Didattica della fisica*, cit., p. 134 e seg.

assai distante da quelle che utilizziamo nel nostro vivere quotidiano»<sup>65</sup>. Non solo. Questa riduzione ontologica del reale alla sua rappresentazione matematica, di cui Husserl aveva già preconizzato limiti e pericoli ne *La crisi delle scienze europee*<sup>66</sup>, suscita una fiducia incondizionata – e dunque irrazionale – nella scienza che, conferendole indirettamente un carattere dogmatico, la inabilita alla sua funzione di luogo di esercizio del pensiero critico, in aperto conflitto con gli abiti mentali aperti, critici, flessibili e pluriprospectici che un'autentica educazione scientifica dovrebbe promuovere.

---

<sup>65</sup> M. R. Sciarretta, R. Stilli, «Educare alla Scienza: un problema complesso», in N. Grimellini Tomasini, G. Segrè, *Conoscenze scientifiche: le rappresentazioni mentali degli studenti*, cit., p. 10.

<sup>66</sup> Denunciando i limiti dell'obiettivismo moderno che riduce il mondo e con esso la razionalità scientifica a mero fatto scrive il filosofo: «[...] è estremamente importante rilevare come già con Galileo fosse avvenuta una sovrapposizione del mondo matematicamente sustruito delle idealità all'unico mondo reale, al mondo che si dà realmente nella percezione, al mondo esperito ed esperibile — al mondo-circostante-della-vita. Questa sovrapposizione è stata ereditata dai successori, dai fisici di tutti i secoli successivi». (E. Husserl, *La crisi delle scienze europee*, cit., pp. 77-78). Proprio per questo motivo Husserl definisce Galileo, «un genio che scopre e insieme occulta» (Ivi, p. 81). Egli scopre di fatto la possibilità di trasformare la natura percepita in una natura matematica determinabile sistematicamente, ma insieme occulta le condizioni di possibilità e i limiti di validità di questa operazione. «Già con Galileo comincia dunque la sovrapposizione della natura idealizzata a quella intuitiva pre-scientifica» (Ivi, p. 78-79), sovrapposizione divenuta il presupposto implicito di coloro che - riducendo ingenuamente la realtà alla sua rappresentazione matematica, il fenomeno reale al modello idealizzato - prendono “per il vero essere quello che invece è soltanto un metodo, un metodo che deve servire a migliorare mediante «previsioni scientifiche» in un “*progressus in infinitum*”, le *previsioni grezze*, le uniche possibili nell'ambito di ciò che è realmente esperito ed esperibile nel mondo-della-vita; l'abito ideale poté far sì che il *senso proprio del metodo, delle formule, delle “teorie”* rimanesse *incomprensibile* e che durante l'elaborazione ingenua del metodo non venisse mai compreso». (Ivi, pp. 80-81). Per un approfondimento si rinvia a P. Spinicci, «Il mondo della vita e il problema della certezza. Riflessioni per una diversa lettura della “Crisi delle scienze europee”», in A. Ferrarin (a cura di), *Passive Synthesis and Life-World: sintesi passiva e mondo della vita*, cit.; V. De Palma, «Scienza ed esperienza prescientifica nell'interpretazione husserliana di Galileo», in *Fondamenti e filosofia della fisica*, a cura di V. Fano, Il Ponte Vecchio, Cesena, 1996, pp. 263-276; V. Fano, *Matematica ed esperienza nella fisica moderna*, Accademia Nazionale di Scienze Lettere e Arti Modena, Il Ponte Vecchio, Cesena, 1996; M. Tombolato, «I processi di oggettivazione mediante la matematizzazione», in C. Tatasciore, P. Graziani, G. Grimaldi (a cura di), *Prospettive Filosofiche: Ontologia*, Bonanno Editore, 2012, pp. 19-30.

L'eco di posizioni ingenuamente «realiste» o «empiriste» si ravvisa anche nella tendenza, da parte di alcuni insegnanti<sup>67</sup>, a rivendicare la superiorità delle scienze «nomotetiche», concepite come esempi di un unico modello esplicativo universale, rispetto a quelle «ideografiche»: solo le prime, infatti, consentono di enunciare leggi matematizzabili universalmente valide, formulate sulla base di ripetute misurazioni di fenomeni riproducibili, e di appellarsi «all'evidenza di fatti empirici per dedurre e dimostrare inconfutabilmente, quasi necessità da questi imposta, la "verità" di una spiegazione scientifica»<sup>68</sup>. A questa forma popolare di "induttivismo ingenuo", corredato dal mancato riconoscimento del carattere contestuale delle affermazioni e dei risultati scientifici, si accompagna inoltre il mito della misura esatta, della precisione che deve condurre a previsioni sempre più accurate, sullo sfondo di un modello riduzionista e meccanicista dell'universo.

Anche in questo caso, la distanza che separa tali luoghi comuni dalla reale pratica scientifica (*savoir savant*) si avverte con evidenza non appena rammentiamo quanto sia problematico attribuire alle leggi della meccanica, tanto a quelle fondamentali quanto a quelle fenomenologiche, lo *status* di generalizzazioni empiriche di carattere universale. Nel primo caso Giere sostiene, infatti, come sia sufficiente considerare anche il più semplice fra gli esempi riportati in un qualsiasi manuale standard per accorgersi che «se vengono considerate come enunciati empirici generali, le leggi del moto debbono essere giudicate false o, al massimo, come irrilevanti per la scienza

---

<sup>67</sup> Queste posizioni sono state rilevate dall'analisi delle risposte di alcuni gruppi di insegnanti durante una ricerca coordinata da Michela Mayer di cui si riferisce in Id., «Immagini della scienza e dell'insegnamento», in M. Vicentini, M. Mayer (a cura di), *Didattica della fisica*, cit., p. 136.

<sup>68</sup> M. R. Sciarretta e R. Stilli, «Educare alla Scienza: un problema complesso», in N. Grimellini Tomasini, G. Segrè, *Conoscenze scientifiche: le rappresentazioni mentali degli studenti*, cit., p. 6. Per un approfondimento sulle implicazioni di questa posizione epistemologica si rinvia a A. F. Chalmers, *What Is This Thing Called Science?*, Open University Press, Buckingham, 1999, dove la visione empirista e positivista della scienza che si richiama all'evidenza dei fatti nella costruzione delle teorie scientifiche viene ampiamente discussa, problematizzata nonché considerata nelle sue conseguenze.

della meccanica»<sup>69</sup>; la loro funzione nella costruzione di un modello di un qualche sistema fisico – abbiamo visto – consiste piuttosto nel fornire uno schema generale da completare con una specifica funzione di forza così da poter derivare leggi fenomenologiche<sup>70</sup> (ad esempio la legge del pendolo) da sottoporre a verifica empirica.

Nemmeno in questo secondo caso, tuttavia, si può aporomaticamente parlare di asserzioni empiriche generali: le leggi fenomenologiche contengono infatti idealizzazioni e approssimazioni tali per cui esse valgono solo *ceteris paribus*, vale a dire ammesso che rimangano invariate tutte le altre condizioni<sup>71</sup>. Contrariamente a quanto comunemente si ritiene, sottolinea Ernan McMullin<sup>72</sup>, le leggi scientifiche non possono mai essere asserite in maniera categorica: formulare una legge scientifica non equivale infatti a descrivere qualcosa che accade in tutte le possibili circostanze; significa piuttosto specificare ciò che si verifica in condizioni “normali”, vale a dire se tutte le altre variabili causalmente rilevanti sono mantenute costanti. E che ciò non sia affatto scontato lo dimostra l’emblematico titolo (*The Galileo Bias*) dell’articolo in cui sono compendiate le ricerche condotte da Crystal D. Oberle e colleghi, da cui si evince chiaramente come

---

<sup>69</sup> R. Giere, *Spiegare la scienza*, cit., p. 127. Giere nota anche come l’interpretazione delle leggi del moto come asserzioni generali empiriche rivesta un ruolo importante nella prospettiva dell’empirismo logico che, considerando le teorie fisiche come sistemi assiomatici, pone quelle leggi come assiomi di tali sistemi. Come precedentemente chiarito, tuttavia, tale prospettiva si pone come obiettivo una ricostruzione logico-razionale delle teorie scientifiche, ma non rispecchia il modo in cui quelle teorie vengono comprese e utilizzate dagli scienziati. Ivi, pp. 108-109.

<sup>70</sup> Questa, naturalmente, è una ricostruzione che avviene sul piano logico e che serve a mostrare il differente livello di generalità delle varie leggi; nella realtà della pratica, invece, più frequentemente le leggi fenomenologiche vengono formulate a partire dai risultati di misurazioni empiriche (ovvero sulla base di modelli dei dati) e forniscono lo spunto per impostare equazioni di carattere più generale. Si veda, ad esempio, M. C. Galavotti, «On Patrick Suppes’ philosophy of science», in P. Humphreys (a cura di), *Patrick Suppes: Scientific Philosopher*, cit.

<sup>71</sup> Le clausole *ceteris paribus* sono clausole che limitano la validità di una legge ai casi in cui intervengano solo i fattori presi in considerazione dalla legge stessa e al netto di fattori differenti. Per un approfondimento sul ruolo di suddette clausole nella definizione di legge fisica si rinvia a M. Dorato, *Il software dell’universo: saggio sulle leggi di natura*, Bruno Mondadori, Milano, 2000, p. 150 e seg.

<sup>72</sup> E. McMullin, «Galilean idealization», cit., p. 268.

le clausole *ceteris paribus* rappresentino, sia sul piano epistemologico sia su quello didattico, un ostacolo tutt'altro che trascurabile.

Un discorso analogo può essere fatto per la ricerca di precisione: in primo luogo, come mette in luce Kuhn, il tentativo di migliorare continuamente il ragionevole accordo tra la teoria e i “fatti” dà conto solo della pratica “normale” della scienza; in secondo luogo, il monito di Fermi ci ricorda come la bontà di una misura vada commisurata allo scopo prefissato; in terzo luogo, Mayer<sup>73</sup> – commentando Cini – puntualizza come precisione e predittività camminino di pari passo solo in un mondo semplificato di fenomeni rappresentabili mediante funzioni lineari, mentre tale binomio perde di coerenza con l'emergere, in differenti domini scientifici e in particolare nella fisica, di fenomeni complessi che reclamano invece l'assunzione di una prospettiva sistemica<sup>74</sup>.

Questa sensibilità di stampo baconiano per la collezione di informazioni sempre più approfondite e precise sul mondo si fa portavoce di un'immagine lineare e cumulativa dello sviluppo scientifico, epistemologicamente ingenua ma comunemente diffusa, che risponde a un'istanza di ricerca della verità perseguita, per citare Bachelard<sup>75</sup>, attraverso successive approssimazioni e rettificazioni. La parzialità di una simile concezione – controbilanciata in Bachelard dal riconoscere che il progresso scientifico presuppone anche il superamento di ostacoli epistemologici intrinseci al processo conoscitivo – conduce i docenti che non ne sono avvertiti a sottovalutare, sul piano epistemologico, il fondamentale ruolo dell'errore come fattore di critica e crescita all'interno della dinamica della conoscenza scientifica e, di riflesso, a cercare, sul piano

---

<sup>73</sup> M. Mayer, «Immagini della scienza e dell'insegnamento» in M. Vicentini, M. Mayer (a cura di), *Didattica della fisica*, cit., p. 138.

<sup>74</sup> Per un approfondimento sulla prospettiva sistemica e per una sua lettura in chiave pedagogica si rinvia a B. Martini, *Pedagogia dei saperi*, cit., cap. 1, pp. 11-63.

<sup>75</sup> G. Bachelard, *La formazione dello spirito scientifico*, cit. Su Bachelard si veda anche B. Martini, *Pedagogia dei saperi*, cit., pp. 78-80; F. Bonicalzi, *Leggere Bachelard: le ragioni del sapere*, JacaBook, Milano, 2007.

didattico, di prevenirlo o di emendarlo rapidamente, senza coglierlo come una risorsa per promuovere una comprensione più profonda<sup>76</sup>. Scrive Popper a riguardo:

Evitare errori è un ideale meschino: se non osiamo affrontare problemi che siano così difficili da rendere l'errore quasi inevitabile, non vi sarà allora sviluppo della conoscenza. In effetti, è dalle nostre teorie più ardite, incluse quelle che sono erronee, che noi impariamo di più. Nessuno può evitare di fare errori; la cosa più grande è imparare da essi<sup>77</sup>.

Sul ruolo dell'errore nella costruzione di nuova conoscenza si pronuncia anche il matematico Federico Enriques con considerazioni epistemologiche dall'evidente risvolto pedagogico:

Il maestro sa che la comprensione degli errori dei suoi allievi è la cosa più importante della sua arte didattica [...]. E degli errori propriamente detti, che talora sono in rapporto con manchevolezze delle singole menti, ma nei casi più caratteristici si presentano come tappe naturali del pensiero nella ricerca della verità, il maestro sa valutare il significato educativo: sono esperienze didattiche che egli persegue, incoraggiando l'allievo a scoprire da sé la difficoltà che si oppone al retto giudizio, e perciò anche ad errare per imparare a correggersi. Tante specie di errori possibili sono altrettante occasioni di apprendere. Per esempio, chi osa estrapolare il risultato di osservazioni contenute in un certo ambito, corre il rischio di vedere fallire una verità affermata al di là dei suoi limiti [...] ma senza quel rischio nessuna esplorazione scientifica sarebbe possibile<sup>78</sup>.

Ispirandoci alle considerazioni dei due studiosi – che ricordano da vicino le posizioni di Gardner – potremmo pertanto sostenere come, in campo scientifico, un apprendimento autentico e significativo sia necessariamente lastricato di errori i quali, fungendo da cartina di tornasole, informano il

---

<sup>76</sup> Sulla funzione dell'errore in ambito didattico si veda, ad esempio, B. Martini, *Didattiche disciplinari*, cit., p. 89 e seg.; D. Antiseri, *Didattica delle scienze*, cit., p. 175 e seg. e p. 225 e seg.

<sup>77</sup> K. Popper, «La teoria del pensiero oggettivo», in Id., *Conoscenza oggettiva: un punto di vista evoluzionistico*, Armando, Roma, 2002, pp. 209-255, p. 242.

<sup>78</sup> F. Enriques (1936), *Il significato della storia del pensiero scientifico*, Barbieri, Manduria (TA), 2004, p. 18.

docente attento e didatticamente attrezzato sullo stato di avanzamento e di evoluzione del processo di comprensione.

A conclusione di questa breve rassegna segnaliamo un ultimo pregiudizio, imputato da Mayer anche a molti docenti universitari, concernente la presunta esistenza di un unico metodo, universale e atemporale, ai cui standard di rigore qualsiasi tipo di scienza che voglia definirsi tale dovrebbe conformarsi. Contro un simile dogma, senza tuttavia sconfinare nel relativismo spinto di Paul Feyerabend<sup>79</sup>, si rivolge la critica più moderata formulata da Alan Chalmers<sup>80</sup>, basata principalmente su un'analisi storica della scienza e su una puntuale considerazione della pratica scientifica contemporanea. Appellandosi all'evidenza della realtà storica anche Mayer sottolinea come l'esistenza di un unico metodo capace di fornire un accesso privilegiato alla verità sia solamente una chimera riconducibile, ancora una volta, alla confusione tra mappa e territorio<sup>81</sup>, tra modello e realtà rappresentata.

Proprio in merito alla costruzione di modelli, infatti, l'analisi condotta nel precedente capitolo lascia trapelare in più punti come tale complessa attività non possa essere proceduralizzata, ossia tradotta in una rigida sequenza di passi che, qualora rispettata, conduca direttamente alla risoluzione del problema. Inoltre, è sempre il paradigma di riferimento a stabilire quali domande sono da considerarsi legittime, così come le strategie di base accettate per la soluzione di problemi e le procedure di verifica sperimentale ammesse. Concordiamo pertanto con Mayer nel sostenere come il "mito del metodo" rappresenti spesso solo un modo per rivendicare la «razionalità dell'impresa scientifica», razionalità che, tuttavia, non necessita di «norme rigide e di regole predefinite, ma, [...] di un confronto da un lato con la

---

<sup>79</sup> P. Feyerabend, *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza*, Milano, Feltrinelli, 2002.

<sup>80</sup> A. F. Chalmers, *What Is This Thing Called Science?*, cit.

<sup>81</sup> M. Mayer, «Immagini della scienza e dell'insegnamento» in M. Vicentini, M. Mayer (a cura di), *Didattica della fisica*, cit., p. 141.



realtà (e quindi osservazioni e se possibile esperimenti) dall'altro con una comunità scientifica che garantisce, all'interno dei suoi limiti culturali, un dibattito e una critica serrata delle teorie proposte e degli argomenti portati a suo sostegno»<sup>82</sup>.

Grazie all'importanza conferita all'accordo intersoggettivo è dunque possibile riabilitare il ruolo del soggetto all'interno della scienza, soggetto a cui non spetta più solamente il compito di "avviare una macchina" che poi procede in completa autonomia, ma che deve assumersi di volta in volta la responsabilità delle scelte compiute, mettendo in discussione, ove necessario, assunti dati per scontati, nello spirito antidogmatico di un continuo confronto critico e costruttivo. D'altronde, come Giere ha messo in luce, la stessa possibilità di fondare sulla relazione di somiglianza selettiva l'utilizzo dei modelli come strumenti di rappresentazione della realtà chiama in causa l'introduzione di un agente intenzionale per sopperire all'assenza di un'intrinseca relazione rappresentazionale tra modello e sistema empirico. Muovendo da quest'ordine di considerazioni, intendiamo ora disporci sul versante della relazione insegnante-allievo per discutere, da questa particolare angolazione, alcune possibili condizioni di funzionamento e disfunzionamento dell'interazione comunicativa tra i due attori del processo di insegnamento-apprendimento, sullo sfondo di un'interpretazione del linguaggio e della comunicazione umana centrata sul costrutto di intenzionalità condivisa che Giere riprende dallo psicologo Michael Tomasello.

#### *4. Il lato insegnante-allievo: il terreno comune condiviso*

In opposizione all'innatismo chomskiano che vede nel linguaggio un organo biologico prodotto dal codice genetico umano alla stregua di qualsiasi altro

---

<sup>82</sup> Ivi, p. 142.

organo, Tomasello propone una soluzione alternativa in cui, affiancando natura e cultura, riconduce il suo sviluppo alle complesse e articolate interazioni sociali e culturali che caratterizzano la nostra specie, a loro volta rese possibili dalla capacità, originatasi evolutivamente, di lettura della mente o delle intenzioni altrui<sup>83</sup>. Assumendo la teoria linguistica elaborata dallo psicologo come solido background per un'interpretazione intenzionale dei modelli e della rappresentazione in generale, Giere formula uno schema esemplificativo paradigmatico (riportato qui di seguito) dei processi comunicativi tra scienziati che commenta in questi termini:

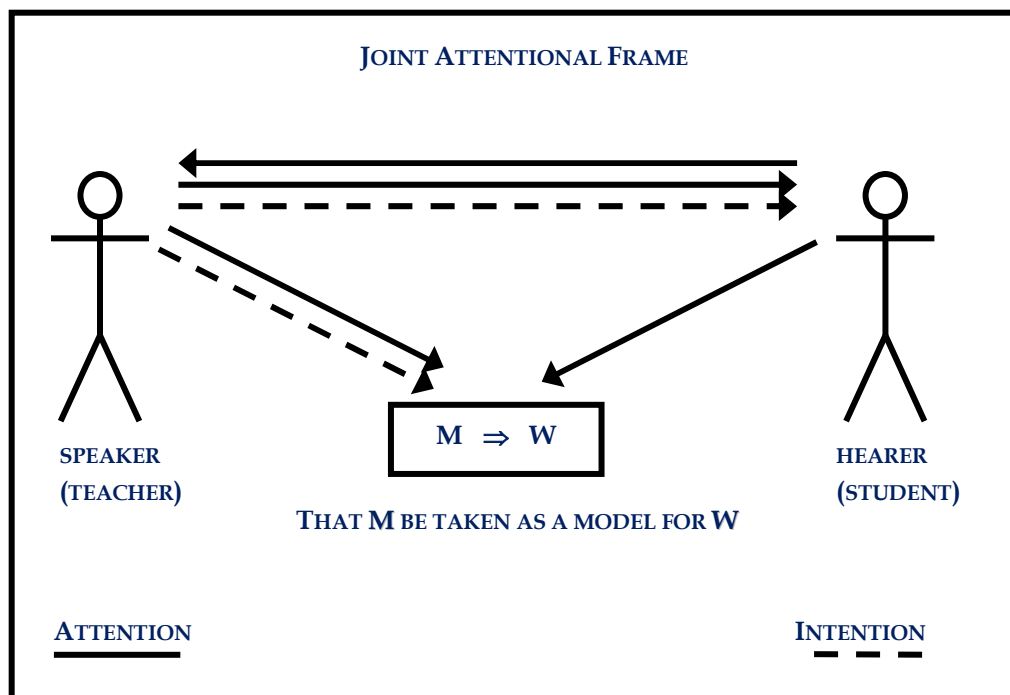
Here speakers direct their attention to a hearer with the intention that hearers direct their attention both to the speaker and to some particular state of affairs. In Tomasello's picture, the state of affairs is typically a visible object of some sort, although it could also be a visible process. In my version, the state of affairs is more abstract. Here speakers intend that hearers should understand that they are being asked to consider (or believe, etc.) the claim that M is to be taken as a model of W. This sort of situation sometimes exists in actual scientific practice when a speaker addresses one or more hearers in person. More often, of course, a scientist is addressing colleagues through some medium, such as a publication<sup>84</sup>.

Declinato in senso pedagogico-didattico, il modello cooperativo della comunicazione umana proposto da Tomasello nella versione rivisitata da Giere può essere considerato come un caso particolare del triangolo insegnante-allievo-sapere teorizzato negli studi di matrice didattico-disciplinare, dove la generica coppia comunicatore-ricevente viene sostituita da quella più specifica insegnante-allievo.

---

<sup>83</sup> M. Tomasello, *Le origini della comunicazione umana*, cit., p. 17. Si veda inoltre S. Dellantonio, «Recensione a M. Tomasello, *Le origini della comunicazione umana*», in *Rivista internazionale di filosofia e psicologia*, 1 (1-2), 2010, p. 97-99. Per un approfondimento sulla teoria della grammatica universale di Noam Chomsky si rinvia a P. Tabossi, «Lingue e linguaggio», in M. Zorzi, V. Girotto (a cura di), *Fondamenti di psicologia generale*, Il Mulino, Bologna, 2004, pp. 207-214; L. Messeri, «L'orientamento Biologico Della Linguistica Chomskiana. Grammatica Universale e Dati Sperimentali», *Annali Del Dipartimento di Filosofia*, 11, 2005, pp. 227-274.

<sup>84</sup> R. Giere, «An agent-based conception of models and scientific representation», cit., p. 276.



**Fig.1** Schema della concezione intenzionale della comunicazione rivisitato in chiave didattico-disciplinare<sup>85</sup>

In quanto peculiare forma di interazione comunicativa, anche i processi di insegnamento-apprendimento obbediscono dunque ai vincoli posti in evidenza da tale schema ovvero presuppongono che gli attori coinvolti siano «capaci di impegnarsi socialmente in atti di intenzionalità condivisa»<sup>86</sup>. Tale infrastruttura psicologica originatasi nel corso dell'evoluzione comprende, secondo Tomasello, abilità socio-cognitive necessarie a creare attenzione congiunta, intenzioni congiunte, conoscenza comune e credenze condivise, all'interno di un contesto di motivazioni cooperative volte all'aiuto e alla condivisione. Siffatte abilità cognitive rappresentano, pertanto, le condizioni fattuali necessarie affinché si instauri quel «contesto condiviso

<sup>85</sup> Rivisitazione in chiave didattico-disciplinare dello schema proposto da Giere (Id., «An agent-based conception of models and scientific representation», cit., p. 277), a sua volta ispirato a quello di Tomasello.

<sup>86</sup> M. Tomasello, *Le origini della comunicazione umana*, cit., p. 71.

intersoggettivo»<sup>87</sup> – inteso come l’insieme di conoscenze, credenze e presupposizioni reciprocamente assunte come condivise e scontate dagli interlocutori – entro il quale l’atto comunicativo diventa comprensibile. Per chiarire meglio quest’ultimo concetto, che Tomasello paragona al “terreno comune” di cui parla Herbert Clark<sup>88</sup>, riportiamo quanto scrive l’autore in un passo tratto da *L’origine della comunicazione umana*:

La conversazione quotidiana è piena di scambi comunicativi come: Ernie: “Ti va di andare al cinema?”; Bert: “Domani ho un esame”, in cui Ernie può capire la risposta di Bert solo in presenza di un cospicuo sfondo di conoscenza condivisa e

---

<sup>87</sup> Ivi, p. 73.

<sup>88</sup> Il “terreno comune” (*common ground*) è, secondo Clark, la somma di tutte le informazioni che le persone assumono come sfondo della conversazione. La nozione è stata originariamente introdotta da Robert Stalnaker – il quale, a sua volta prese spunto dal costrutto di “conoscenza condivisa” formulato da David Lewis - per rendere conto del modo in cui l’informazione si accumula nella conversazione. Cfr. H.H. Clark, S. E. Brennan, «Grounding in communication», in L.B Resnick, J.M. Levine, S.D. Teasley (a cura di), *Perspectives on socially shared cognition*, American Psychological Association, Washington, 1991, pp. 127-149. Si veda inoltre R. Stalnaker, «Common Ground», in *Linguistics and Philosophy*, 25, 2002, pp. 701–721. Sempre in merito al costrutto di conoscenza condivisa o terreno comune Francesca Bosco si esprime in questi termini: «La conoscenza condivisa è l’insieme di credenze che un individuo pensa di condividere con un numero di persone che va da uno a tutto il genere umano. La conoscenza condivisa è il terreno comune [...] sul quale due persone costruiscono una conversazione. L’ampiezza di questo terreno comune ha necessariamente una certa estensione di partenza, ed aumenta a seconda delle affinità sociali, culturali oppure private condivise da due o più persone per il semplice fatto di appartenere al genere umano, tutti gli uomini hanno una certa conoscenza condivisa. Tutti noi, ad esempio, abbiamo la consapevolezza che le altre persone mangiano, dormono, soffrono, amano e così via. Preso inoltre, nel corso della vita, apprendiamo una serie di nozioni di comportamento sociale inizialmente semplici e via via più complesse, che ci consentono di comunicare in maniera sempre più efficace con i nostri simili. Individui che appartengono ad una certa comunità culturale, ad esempio quella italiana, considerano condivise una serie di conoscenze convenzionali: guidare a destra, tifare per la nazionale di calcio, mangiare pasta come prima portata. Gli inglesi condividono invece la conoscenza che si guida a sinistra, i canadesi che si tifa per la nazionale di hockey su ghiaccio, i francesi che la pasta è un contorno. Le comunità culturali possono poi essere incassate in categorie via via più specifiche. All’interno di ogni singola categoria aumenta la quantità di conoscenza, relativa a quel determinato settore, condivisa dai membri che vi appartengono. Pensate alle conoscenze comuni che caratterizzano gli studenti, gli studenti universitari, gli studenti che frequentano il corso di laurea in psicologia piuttosto che in ingegneria, ecc. Esiste infine una parte di conoscenza molto vasta che si condivide solo con un numero ristretto di persone, come per esempio gli amici o i familiari. La conoscenza che pensate sia condivisa con un’altra persona influenza sia le cose che dite, sia il modo in cui le dite [...]». F.M. Bosco, *Linguaggio e comunicazione*, in G. Pravettoni, M. Miglioretti (a cura di), *Processi cognitivi e personalità. Introduzione alla psicologia*, Franco Angeli, Milano, 2003, pp. 159-180, in particolare p. 178.

inferenze empiriche che sfuggono a qualsiasi codice (per esempio, la conoscenza che avere un esame l'indomani implica studiare tutta la notte e questo a sua volta implica che non è il caso di andare al cinema la sera prima)<sup>89</sup>.

Il «“codice” linguistico» – sostiene lo psicologo richiamandosi al nesso tra linguaggio e forma di vita (*Lebensform*) invocato da Wittgenstein<sup>90</sup> – «riposa dunque su un'infrastruttura non linguistica di comprensione intenzionale e terreno concettuale comune, il cui ruolo è di fatto logicamente primario»<sup>91</sup>.

La comunicazione umana è quindi un'impresa sostanzialmente cooperativa, che funziona nel modo più naturale e senza intoppi entro il contesto di (1) un terreno concettuale comune reciprocamente posto e (2) motivazioni comunicative cooperative reciprocamente poste<sup>92</sup>.

Sulla base di quanto teorizza Tomasello – le cui ricerche si inscrivono nel solco tracciato in origine da filosofi quali Wittgenstein e Paul Grice<sup>93</sup> – il successo degli scambi comunicativi dipende quindi, in larga misura, dalla «capacità di creare un terreno concettuale comune – attenzione congiunta, esperienza condivisa, conoscenza culturale comune» – che, come rileva lo psicologo, «è una dimensione assolutamente critica di tutta la comunicazione umana»<sup>94</sup>. Clark, a questo proposito, postula due principali categorie di terreno comune: il “terreno comune personale” (*personal*

---

<sup>89</sup> M. Tomasello, *Le origini della comunicazione umana*, cit., p. 60. Per una panoramica più esaustiva si veda anche Id., *Le origini culturali della cognizione umana*, Il mulino, Bologna, 2005.

<sup>90</sup> L. Wittgenstein, *Ricerche filosofiche*, Einaudi, Torino, 1999. Per un approfondimento si rinvia a P. Spinicci, *Lezioni sulle «Ricerche filosofiche» di Ludwig Wittgenstein*, CUEM, Milano, 2002; G. Piana, *Commenti a Wittgenstein*, disponibile all'indirizzo Internet: [http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc\\_download/110-commenti-a-wittgenstein](http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc_download/110-commenti-a-wittgenstein).

<sup>91</sup> M. Tomasello, *Le origini della comunicazione umana*, cit., p. 60.

<sup>92</sup> Ivi, p. 19.

<sup>93</sup> P. Grice, *Logica e conversazione: saggi su intenzione, significato e comunicazione*, Il mulino, Bologna, 1993.

<sup>94</sup> M. Tomasello, *Le origini della comunicazione umana*, cit., p. 18.

*common ground*) costituito da esperienze di tipo percettivo e/o linguistico-comunicativo condivise da due o più persone; il “terreno comune comunitario” (*communal common ground*) che rappresenta invece l’informazione condivisa con gli altri membri della comunità (o meglio delle comunità) cui si appartiene e che può riguardare usi e costumi così come forme di conoscenza e di *expertise*<sup>95</sup>.

Ora, nell’ambito specifico della comunicazione tra scienziati in cui si colloca la versione rivisitata da Giere, questo terreno comune condiviso comprende tutto ciò che concerne il paradigma di riferimento, inclusa la conoscenza che gli scienziati tacitamente apprendono confrontandosi con i medesimi casi esemplari e che contribuisce di fatto a garantire la possibilità del dialogo e della critica su cui si costruisce l’impresa scientifica. In questo esempio di scambio tra “pari”, vale a dire tra membri del medesimo gruppo, l’implicito appartenente al terreno comune – quel terreno necessario, secondo Tomasello, affinché «il ricevente possa determinare sia *ciò* verso cui il comunicatore vuole che egli volga l’attenzione (intenzione referenziale), sia il *perché* lo sta facendo (intenzione sociale)»<sup>96</sup> – pur in assenza di una tematizzazione diretta non genera significative complicazioni, poiché deriva dall’aver ricevuto la medesima educazione scientifica ossia, per dirla con Wittgenstein, dalla condivisione di un medesimo “stile di vita” a cui di fatto si lega la possibilità di un accordo. Con questo non si vuole sostenere che la comunicazione tra esperti sia completamente aproblematica, ma semplicemente che la possibilità di accogliere o rigettare l’ipotesi avanzata da un collega riposa in primo luogo sulla capacità di identificare il referente del discorso. In altri termini, la comunità scientifica può accettare o rifiutare l’affermazione che il costrutto

---

<sup>95</sup> H. H. Clark, «Context and common ground», in A. Barber, R. J. Stainton (a cura di), *Concise Encyclopedia of Philosophy of Language and Linguistics*, Elsevier, Amsterdam, 2010, pp. 85-87. Leggermente differente la categorizzazione di Tomasello per cui si rinvia a Id., *Le origini della comunicazione umana*, cit., pp. 75-76.

<sup>96</sup> M. Tomasello, *Le origini della comunicazione umana*, cit., p. 73.

idealizzato “M” debba essere considerato un modello del sistema empirico “W” perché conosce qual è, all’interno del paradigma vigente, il significato – inteso wittgensteinianamente come regola d’uso - dell’espressione “essere modello di qualcosa”.

Diversamente stanno le cose nello scambio comunicativo tra docente e discente – ovvero tra “membri di comunità differenti” – dove l’asimmetria della relazione si palesa, innanzitutto, sotto forma di un terreno comune molto più limitato, il quale, non includendo le medesime credenze paradigmatiche relative alla fisica e al suo funzionamento, esclude *eo ipso* anche l’accordo sulle regole che rendono sensato il rappresentare un fenomeno fisico reale attraverso un costrutto ideale caratterizzato da un insieme di equazioni.

Sebbene quest’asimmetria di contenuto<sup>97</sup> sia ovviamente nota ai docenti, tuttavia, molto spesso accade che, proprio in ragione di convinzioni ascrivibili alla pedagogia popolare da cui sono guidati nella loro attività didattica, tale sbilanciamento venga esclusivamente riferito al possesso di conoscenze di primo livello (proto-apprendimenti), mentre, in realtà, andrebbe più opportunamente avvertito nei termini di un modo differente di vedere le cose, ovvero della diversa “visione del mondo” che contraddistingue i due agenti della relazione di insegnamento-apprendimento.

Come abbiamo cercato di mettere in luce in precedenza, infatti, le convinzioni erranee rilevate negli studenti – sia in quelli osservati da Schecker sia nei partecipanti al laboratorio di fisica – possono essere meglio inquadrare e, di conseguenza, più efficacemente gestite, se attribuite non a una semplice mancanza di conoscenza bensì all’assenza di consapevolezza del paradigma scientifico di riferimento. Scambiando per casi reali gli esperimenti mentali che compaiono come esercizi nei manuali, gli studenti

---

<sup>97</sup> Sull’asimmetria di contenuto si veda B. Martini, *Didattiche disciplinari*, cit., p. 57 e seg.

mostrano, appunto, di non distinguere debitamente i due livelli in cui si articola il lavoro del fisico: quello matematico della costruzione del modello e quello empirico della sua validazione. Lo stesso dicasi delle ricerche condotte rispettivamente da Fishbein e da Oberle<sup>98</sup> e colleghi, le quali, poste a confronto, rivelano un'irrisolta tensione tra fenomeno empirico e modello ideale, indice della mancata comprensione della peculiare modalità con cui la fisica rappresenta la realtà.

Riconoscere quanto tali difficoltà siano radicate nelle dinamiche della comunicazione non significa, tuttavia, rassegnarsi all'impossibilità di porvi rimedio. Per quanto il nesso tra forme del linguaggio e "stili di vita" – che i casi succitati paiono avallare – complichi *di fatto*, disseminandoli di ostacoli, gli scambi comunicativi "inter-culturali", tale correlazione non ne esclude di principio la possibilità: rammentando Wittgenstein, non vi sono, infatti, giochi linguistici disponibili all'interno di una data comunità – nel nostro caso quella dei fisici – che non possono essere appresi da chi invece a quella comunità non appartiene. A questo riguardo scrive Paolo Spinicci:

[...] riconoscere che una forma di vita non contempla un determinato gioco linguistico non significa affatto sostenere che quel gioco non possa essere inteso da chi non appartiene a quella cultura: vuol dire solo che la catena di esempi che rende conto di un gioco linguistico deve arretrare di qualche passo per *ritrovare il terreno dell'accordo* e per ricostruire poi la trama che restituisce ai comportamenti il senso che loro compete<sup>99</sup>.

Ricondotto alla nostra problematica, un simile riconoscimento implica la messa in discussione del concetto di modello come "elemento primitivo" a partire dal quale progettare un progressivo ampliamento del terreno comune. Si tratta, in altri termini, di interrogarsi sui medesimi quesiti suggeriti da Bruno d'Amore nella sua riflessione sul problema degli "elementi primi" nel campo della didattica della matematica:

---

<sup>98</sup> A questo proposito si rinvia a quanto esposto nel primo capitolo.

<sup>99</sup> P. Spinicci, *Lezioni sulle "Ricerche filosofiche" di Ludwig Wittgenstein*, cit., p. 60.



Cosa vuol dire “semplice da capire”? Il “semplice” è un fatto assoluto o relativo? Il “semplice” è tale indifferentemente, tanto per lo scienziato quanto per lo studente alle prime armi? O c'è differenza?<sup>100</sup>

Sulla scia di questi interrogativi tutt'altro che scontati, possiamo allora domandarci se davvero abbia senso per uno studente alle prime armi nello studio della fisica assumere come primitiva, per esempio, la definizione di pendolo semplice, così come riportata da un qualunque manuale, e soprattutto se sia lecito, attenderci che a partire da tale costruzione teorica egli riesca ad evincere in che modo, sotto quali condizioni ed entro quali limiti tale oggetto ideale possa rappresentare un qualche pendolo reale. Un ricorso “ingenuo” ad esperienze di laboratorio non risolve di per sé il problema. Al contrario, se non se ne fa un uso attento e sorvegliato, tali esperienze possono generare nei discenti una confusione ancora maggiore. In questo senso va letto l'ammonimento di Michael Matthews quando confronta, in parallelo, le obiezioni mosse da Guidobaldo del Monte a Galileo con le misconcezioni rilevate dalla ricerca empirica<sup>101</sup>. Contestando al pisano l'evidente incompatibilità tra le leggi matematiche da lui formulate e l'effettivo comportamento dei pendoli reali, Guidobaldo ribadisce che la fisica concerne il mondo materiale, non un ipotetico “mondo di carta”<sup>102</sup>. Di qui la contraddizione apparentemente insanabile che attraversa la fisica, contraddizione che, come abbiamo mostrato nel precedente capitolo, viene risolta all'interno del gioco linguistico “rappresentare attraverso un modello”.

Tale gioco linguistico – che a partire da Galileo è divenuto così familiare da rappresentare un'ovvietà dell'agire scientifico - è in realtà tanto sofisticato

---

<sup>100</sup> B. D'Amore, M. I. Fandiño Pinilla, «La formazione degli insegnanti di matematica, problema pedagogico, didattico e culturale», in F. Frabboni, M.L. Giovannini (a cura di), *Professione insegnante*, Franco Angeli, Milano, 2009, pp. 145 - 153.

<sup>101</sup> M. R. Matthews, «Learning about Scientific Methodology and the “Big Picture” of Science: The Contribution of Pendulum Motion Studies», cit., in particolare p. 208.

<sup>102</sup> Ivi, p. 206.

da aver richiesto secoli perché fossero arginate le difficoltà annesse alla sua costruzione, difficoltà che ancora oggi si ripresentano a coloro i quali sono chiamati ad apprenderne per la prima volta le regole. Sebbene le traduzioni manualistiche scolastiche tacciano sulle problematicità che segnano l'evoluzione del sapere per restituirne un'immagine organica e sistematica, aderente alla visione correntemente accreditata, spetta tuttavia ai docenti, in quanto responsabili dell'apprendimento di questo nuovo e complesso gioco linguistico totalmente avulso dalle abitudini mentali dei discenti, spostare l'attenzione dal prodotto ai processi, retrocedendo dalle definizioni già costituite alle prassi epistemiche rispetto alle quali tale gioco linguistico guadagna un senso e agli ostacoli epistemologici che queste stesse prassi hanno posto a coloro che per primi vi si sono cimentati.

In questo senso, la scelta di aderire ad una didattica critica<sup>103</sup> impone di mantenere viva e costante la tensione dialettica tra l'istanza centrata sul prodotto e quella centrata sul processo, esigenza che qui si traduce nel riconoscimento della necessità di accostare a una descrizione di tipo statico (esposta nel capitolo precedente) che, attraverso un'analisi logica del "prodotto" già costituito, mostra la fisica classica nella sua veste matura, una descrizione di tipo genetico volta a mettere in luce il percorso a ostacoli sotteso alla sua costituzione<sup>104</sup>.

---

<sup>103</sup> Per un approfondimento sull'idea di didattica critica si rinvia a M. Baldacci, «I modelli della didattica nell'epoca della società conoscitiva», in M. Baldacci (a cura di), *I modelli della didattica*, Carocci, Roma, 2004, pp. 13-59, in particolare p. 16 e seg.; B. Martini, «La teoria didattica», in M. Baldacci, F. Pinto Minerva (a cura di), *Razionalità, educazione, realtà sociale. Studi sulla pedagogia di Franco Frabboni*, Franco Angeli, Milano, pp. 51-56.

<sup>104</sup> La scelta di ricorrere in maniera complementare a questi due tipi di descrizione trae libera ispirazione dal metodo fenomenologico husserliano, che, per ovvie ragioni, abbiamo dovuto "riadattare" alle esigenze del percorso qui proposto, senza tuttavia tradire, almeno negli intenti, il suo obiettivo di porsi come metodo di chiarificazione concettuale (Sul metodo della chiarificazione concettuale si veda P. Spinicci, *I pensieri dell'esperienza: interpretazione di Esperienza e giudizio di Edmund Husserl*, La nuova Italia, Firenze, 1985). Per quanto concerne l'analisi statica, essa viene intrapresa a partire dal «già costituito» – nel nostro caso dai modelli così come sono esposti in un qualsiasi manuale – e consiste, come chiarisce Vincenzo Costa, nel «domandarsi a ritroso [...] che cosa ogni grado costitutivo presuppone» (V. Costa, *L'estetica trascendentale fenomenologica*.

E questo perché, come scrive Berta Martini:

In un'ottica di trasposizione in direzione epistemologica dei saperi scientifici, [...] prodotti e processi sono inseparabili giacché è attraverso la messa in atto di processi da parte degli allievi che i prodotti acquistano significato, mentre è attraverso la finalizzazione verso questi ultimi che i processi permettono la costruzione da parte degli allievi di un sistema organico e unitario di conoscenze<sup>105</sup>.

Sullo sfondo di questa premessa si colloca, dunque, la nostra proposta di regredire dal piano delle definizioni già costituite a quello delle prassi epistemiche a partire dalle quali le prime guadagnano il loro senso, al fine di esibire gli ostacoli epistemologici che si frappongono alla costituzione della nozione di modello.

---

*Sensibilità e razionalità nell'opera di Edmund Husserl*, Vita e Pensiero, Milano, 1999, p. 28).

Nell'analisi statica, volta all'esplicitazione dei rapporti di fondazione, «ciò che viene indagato è che cosa viene prima e che cosa viene dopo dal punto di vista della validità» (cit. in *Ibidem*). Nel nostro caso, una descrizione di questo tipo ci ha consentito di comprendere i diversi livelli logici di generalità in cui si articola la gerarchia di modelli cui spetta il compito di mediare tra teoria e realtà. In quest'ottica, infatti, i modelli di principi possono dirsi fondanti rispetto a quelli rappresentazionali poiché vengono da questi ultimi presupposti; lo stesso dicasi per i modelli rappresentazionali più generali rispetto a quelli più specifici, così come per i modelli sperimentali rispetto ai modelli dei dati. Diversamente, l'analisi genetica, fondandosi sul presupposto che qualsiasi oggettualità, per quanto astratta e ideale, sia in ogni caso il punto terminale di un processo, ha di mira l'esibizione della genesi costitutiva di tali idealità (G. Piana, *I problemi della fenomenologia*, seconda edizione con aggiornamenti bibliografici e integrazioni a cura di Vincenzo Costa, lulu.com, 2000, pp. 80-84, disponibile all'indirizzo Internet: [http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc\\_download/79-i-problemi-della-fenomenologia](http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc_download/79-i-problemi-della-fenomenologia)). Un interessante contributo in questo senso, seppur riferito a un differente dominio conoscitivo, è fornito da G. Caniglia, «Organismi esemplari. Osservazioni epistemologiche di ordine descrittivo», *Humana.Mente*, 6, 2008, pp. 101-128.

<sup>105</sup> B. Martini, S. Sbaragli, *Insegnare e apprendere la matematica*, cit., pp. 25-26.



# *Verso una tassonomia degli ostacoli*

## *1. Le ragioni per una tassonomia degli ostacoli*

Dal capitolo precedente è emerso come il concetto di modello, nozione cardine della fisica matematizzata, non possa essere assunta come primitiva nell'insegnamento della fisica, poiché gli studenti non sono in grado – comprensibilmente – di esplicitare e di interpretare correttamente tutto l'implicito che la rappresentazione della realtà attraverso modelli (astratti e/o materiali) di fatto presuppone.

Al fine di individuare le condizioni di possibilità dell' apprendimento significativo di questo nuovo e fondamentale gioco linguistico inaugurato dalla scienza moderna, occorre quindi abbandonare temporaneamente il terreno delle definizioni preconfezionate ed interrogare all'indietro la costituzione di tale costrutto teorico che incorpora idealizzazioni e approssimazioni e che può essere utilizzato – come nel caso dell'oscillatore lineare – per rappresentare fenomeni empirici differenti ma accomunati da similarità epistemica. D'altro canto, sulle orme di Speranza, lo stesso D'Amore, nell'intento di promuovere una didattica consapevole e critica, indica la via della riflessione storico-epistemologica, suggerendo di non

accettare passivamente gli «elementi primi dello scienziato», ma di «ripercorrere la generazione delle idee che hanno portato a scegliere quegli oggetti come oggetti primi»<sup>1</sup>.

Lungo questa direzione si colloca anche il nostro tentativo di intraprendere una chiarificazione del senso delle regole che governano il gioco linguistico “rappresentare mediante un modello” attraverso una ricostruzione della genesi epistemica di tale nozione che, all’interno della prospettiva didattico-disciplinare, si traduce nell’esibizione degli ostacoli epistemologici (di alcuni perlomeno) sottesi alla sua nascita, al suo sviluppo e alla sua applicazione. Ciò tuttavia, non con l’obiettivo di proporre nuovi differenti contenuti in aggiunta a o in sostituzione di quelli generalmente insegnati, ma al fine di migliorare la qualità della loro trasposizione, informando chi la deve amministrare delle difficoltà con cui dovettero misurarsi gli stessi fondatori della fisica classica nel costruire – per esprimerci con Sellars – l’immagine scientifica della realtà a partire dalla sua immagine manifesta.

Il nostro interrogare le fonti storiche non assumerà, pertanto, la forma di un’indagine sulle ragioni psicologiche della convergenza tra le concezioni intuitive degli studenti e alcune delle tesi fondamentali della fisica pregalileiana, ma cercherà di conciliare – in linea con un’opzione pedagogica di matrice problematicista – le istanze del soggetto messe in luce dagli studi empirici nel campo della fisica ingenua e del cambiamento concettuale, con quelle riconducibili alla natura dell’oggetto emerse dall’analisi epistemologica della fisica come *savoir savant*. Le concezioni spontanee, infatti, sono classificabili come misconcezioni solo se giudicate sulla base del sapere accreditato e istituzionalizzato, sapere, tuttavia, che non sorge d’un colpo già nella sua veste matura, ma che a sua volta si è costituito storicamente attraverso il superamento di ostacoli intrinseci alla sua stessa natura.

---

<sup>1</sup> B. D’Amore, «Il ruolo dell’Epistemologia nella formazione degli insegnanti di Matematica nella scuola secondaria», cit., p. 10.

I benefici che sul piano didattico possono derivare da un'analisi in chiave epistemologica dei tratti salienti dell'evoluzione storica della fisica sono reclamati anche da Schecker, che raccomanda il ricorso a testi storici per favorire negli studenti la consapevolezza del mutato paradigma entro cui si collocano i concetti e le leggi della meccanica classica. Ciò che suggerisce lo studioso è appunto l'insegnamento esplicito<sup>2</sup> della nuova visione del mondo inaugurata dalla scienza moderna, così da promuovere nei discenti la consapevolezza necessaria per comprendere il differente contesto esplicativo richiesto dall'uso scientifico di concetti (forza, velocità, movimento, ecc.) che, formatisi originariamente sul piano intuitivo, appartengono, nel vocabolario quotidiano, a giochi linguistici diversi<sup>3</sup>. Maturare la consapevolezza del paradigma di riferimento risulta pertanto, agli occhi dell'autore, un prerequisito fondamentale per la comprensione dei concetti, nonché un obiettivo più realistico da conseguire per l'educazione scientifica rispetto al completo abbandono del pensiero di "senso comune",

---

<sup>2</sup> Scrive Schecker: «The teacher must take into account that Newtonian mechanics is a lot more than laws and concepts. The underlying notions and methodological principles should be taught as explicitly as the three axioms – perhaps in a form similar to our theses I to IV». H. P. Schecker, «Paradigmatic change», cit., p. 75.

<sup>3</sup> Interessanti ci paiono in proposito queste brevi riflessioni di Giovanni Piana: «Un triangolo disegnato su una sfera lo chiameresti ancora triangolo? Potremmo rispondere "sì!" – oppure: "assolutamente no!"»; «Supponi, dopo aver insegnato elementi di geometria piana, di invitare gli allievi a disegnare un triangolo – ma sui loro banchi è stata fatta deporre una semisfera. Alcuni diranno: *su una superficie sferica non è possibile disegnare nessun triangolo. Ed altri invece: una figura triangolare disegnata su una sfera la potremmo ancora chiamare triangolo. Ad esempio triangolo sferico o qualcosa di simile*»; «Possiamo usare uno stesso nome in giochi linguistici differenti, ma dobbiamo essere consapevoli che la differenza del gioco, ne cambia il senso. Nello stesso tempo rientra nel novero delle possibilità interessanti il fatto che si possano stabilire nessi tra giochi linguistici differenti proprio per il fatto che si è deciso di usare lo stesso nome». G. Piana, *Frammenti epistemologici*, lulu.com, 2015, disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/epistemologia/190-frammenti-epistemologici> p. 17. Questo, in effetti, è ciò che accade quando per insegnare i concetti della fisica ci si avvale di idee ancoraggio sorte sul piano intuitivo: sebbene indispensabili, come già insegnava Ausubel (Id., *Educazione e processi cognitivi: guida psicologica per gli insegnanti*, cit.), per poter attivare un apprendimento significativo, occorre, tuttavia, una loro gestione consapevole e attenta al fine di evitare o almeno di non favorire l'insorgere di eventuali misconcezioni.

continuamente alimentato dalla comunicazione quotidiana e dalla diffusione mediatica poco sorvegliata di informazioni scientifiche divulgative.

Per quanto plausibili e almeno parzialmente condivisibili, le conclusioni di Schecker risultano tuttavia problematiche se, coerentemente con la lettura in chiave batesoniana avanzata in precedenza, interpretiamo l'acquisizione del paradigma e con esso l'evolversi della sua consapevolezza come un apprendimento di livello logico superiore che, come tale, non può avere luogo se non collateralmente all'acquisizione di singoli contenuti. In questo senso, insegnare in maniera diretta ed esplicita, come suggerisce Schecker, il sistema di credenze condivise sotteso al paradigma galileiano-newtoniano non rappresenta una proposta facilmente percorribile: da un lato, infatti, implica da parte dei docenti una consapevolezza epistemologica<sup>4</sup> che non può essere data per scontata alla luce di quanto emerso in precedenza; dall'altro, non risolve comunque il problema poiché l'esito di questo tentativo sarebbe al più un mero proto-apprendimento, con scarse ripercussioni sull'acquisizione significativa di concetti specifici. D'altro canto, concordiamo sul fatto che la comprensione profonda di alcuni concetti sofisticati e controintuitivi (ad esempio quello di moto o di forza nella meccanica newtoniana) richiede preliminarmente la consapevolezza di muoversi all'interno di un paradigma affatto differente rispetto alle abitudini mentali consolidate attraverso l'esperienza pratico-percettiva del mondo.

La questione, a nostro avviso, si pone dunque in questi termini: da un lato l'apprensione dei concetti della fisica classica reclama la consapevolezza del paradigma, dall'altro la consapevolezza del paradigma non si può guadagnare direttamente come una qualsiasi acquisizione di primo livello, ma si sviluppa collateralmente a proto-apprendimenti e solo a condizione di una "messa in forma" didattica capace di assicurare autenticità epistemica al

---

<sup>4</sup> Ci si riferisce, in particolare, alla conoscenza tacitamente acquisita nella pratica generalmente non soggetta a tematizzazione diretta e pertanto difficilmente esplicitabile nonché alle filosofie implicite cui faceva riferimento Speranza.



sapere insegnato. Proprio per la sua intrinseca paradossalità, tale problema non si presta a soluzioni univoche e definitive, disponibili nel breve periodo: abbandonata l'ipotesi di un percorso lineare che conduce dalla comprensione dei concetti alla consapevolezza del paradigma o viceversa, si tratta piuttosto di operare una trasposizione didattica – epistemologicamente e pedagogicamente fondata – che consenta di passare da un livello all'altro, ricorsivamente, così da garantire le condizioni di possibilità per sviluppare – nel tempo – una comprensione sempre più adeguata dei giochi linguistici validati all'interno del paradigma newtoniano unitamente alla consapevolezza dei loro limiti di applicazione.

A quest'esigenza si lega dunque il nostro tentativo di abbozzare, seppur in via provvisoria e senza alcuna pretesa di esaustività, una tassonomia di ostacoli – passibile di revisioni, integrazioni ed ampliamenti – con lo scopo, da un lato, di rendere avvertiti i docenti, esplicitandoli, dei nodi teorici costitutivi del sapere stesso al fine di favorirne una migliore gestione sul piano didattico attraverso la scelta di soluzioni traspositive epistemologicamente adeguate; dall'altro – in analogia con la teoria batesoniana – di consentire una corretta interpretazione delle misconcezioni a partire dai tipi logici di ostacoli con cui possono essere messe in relazione, così da facilitare interventi differenziati e mirati a seconda del tipo logico di errore.

Nell'intento di guidare gli insegnanti, come suggerisce D'Amore, a prendere contatto con le «ragioni obiettive dell'esistenza di ostacoli epistemologici»<sup>5</sup>, utilizzeremo sia fonti primarie quali i testi di Galileo – particolarmente incisivi ed efficaci per la forma dialogica in/secondo cui sono redatti – sia fonti “secondarie”<sup>6</sup> provenienti dalla riflessione storico-epistemologica e

---

<sup>5</sup> B. D'Amore, L. Radford, G. T. Bagni, «Ostacoli epistemologici e prospettive socioculturali», *L'insegnamento della matematica e delle scienze integrate*, 29B, 1, 2006, pp. 11-40, p. 17.

<sup>6</sup> Sull'importanza dell'utilizzo di entrambi i tipi di fonti si esprime anche D'Amore. Ivi, p. 17.

filosofica, con l'obiettivo di offrire una "piattaforma problematica" che stimoli i docenti ad un'analisi critica delle proprie assunzioni epistemologiche implicite, aiutandoli al contempo a comprendere e a contestualizzare opportunamente le idee spontanee dei discenti.

Alle voci di Bachelard e di Brousseau che ci ricordano come l'ostacolo epistemologico sia espressione non di mancanza di conoscenza bensì di una conoscenza pregressa, alternativa a quella scientificamente accreditata, vogliamo così unire quella di Giovanni Piana, assumendo a premessa dei paragrafi successivi la riflessione cui ci invita il quesito formulato dal filosofo in questo suo breve frammento:

– Così si parla di evidenza riferendola a principi logici generali. Ad esempio: la parte non può essere maggiore del tutto di cui è parte. E trovi immediatamente il logico sapiente che scuote la testa e ti parla dell'equinumerosità della totalità dei numeri naturali con quella dei numeri pari... Vedi quanto ti può ingannare l'intuizione! Non si parli più di evidenza... Avrà ragione il logico sapiente oppure – *avendo egli cambiato gioco linguistico* – ha semplicemente fatto il gioco delle tre carte?<sup>7</sup>

## *2. I presupposti-ostacolo all'origine della rappresentazione matematica della natura*

Il primo ordine di ostacoli che necessita di essere correttamente inquadrato è del tutto *sui generis*, in quanto intercetta una serie di problemi connessi ai presupposti sottesi alla possibilità di costruire una rappresentazione matematica della realtà naturale. Contrariamente al Simplicio aristotelico, gli studenti non nutrono in genere alcun dubbio circa la legittimità di una fisica matematizzata, salvo poi ricadere – al pari Simplicio – in ragionamenti fallaci che rivelano come siffatto riconoscimento costituisca parte del loro senso comune senza, tuttavia, derivare da un'effettiva comprensione del funzionamento della macchina della scienza. Per favorire

---

<sup>7</sup> G. Piana, *Frammenti epistemologici*, cit., p. 17.

la presa di coscienza dei presupposti implicati da questa nuova forma di rappresentazione della realtà ci lasceremo guidare dalla riflessione articolata da Koyré attorno alla sfida intellettuale che per i contemporanei di Galileo ha costituito ciò che oggi si è invece tramutato in un fatto tanto ovvio da appartenere al sistema di credenze comunemente condivise.

Interrogare il saggio di Koyré assumerà, dunque, per noi il senso di un'indagine sugli "elementi primi" compiuta ripercorrendo a ritroso l'evoluzione della fisica matematizzata fino a individuarne le condizioni di possibilità in due operazioni fondamentali tra loro connesse: l'abolizione del Cosmo e la geometrizzazione dello spazio. In queste due operazioni – di cui ora cercheremo di cogliere e correttamente interpretare tutte le implicazioni – si annuncia, infatti, secondo lo studioso russo, «l'atteggiamento mentale» dei fondatori della scienza moderna nel loro tentativo di «sostituire un modo di procedere puramente naturale, quello del senso comune, con uno che [invece] non lo è affatto»<sup>8</sup>.

L'abolizione del Cosmo significa la distruzione dell'idea di una struttura del mondo finita e ordinata gerarchicamente, di un mondo qualitativamente e ontologicamente differenziato, e la sostituzione del concetto di un universo aperto, indefinito e anche infinito, unito e governato dalle medesime leggi universali; un universo in cui, in contraddizione al concetto tradizionale che distingueva e opponeva i due mondi del Cielo e della Terra, tutte le cose sono allo stesso grado dell'Essere.[...]. Ciò implica la scomparsa dalla visione scientifica di ogni considerazione basata sul valore, sulla perfezione, l'armonia, il significato e lo scopo; scompare nello spazio infinito del nuovo Universo. In questo nuovo universo, in questo nuovo mondo basato sulla geometria resa realtà valgono e trovano la loro applicazione le leggi della fisica classica<sup>9</sup>.

Nella forma presentata da Koyré, questa tesi risulta forse anacronistica o comunque lontana dagli stereotipi degli studenti che, se non conoscono Newton, hanno ancor meno familiarità con l'idea aristotelica di un ordine

---

<sup>8</sup> A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 213.

<sup>9</sup> Ivi, pp. 212-213.

immanente al mondo naturale accessibile ad un'analisi qualitativa che argomenta per generi e specie. Riteniamo, tuttavia, che questa stessa tesi, "ammodernata" e riconsiderata secondo l'angolatura proposta da Husserl, meriti invece di essere attenzionata in quanto foriera di preziosi spunti di riflessione per i docenti.

In un noto passo di *Idee II*, Husserl intercetta una questione che può assumere un certo rilievo anche sul piano didattico ed influire, pertanto, sulla qualità del processo traspositivo. All'interno di un discorso più ampio sul tema della costituzione fenomenologica che qui non è nostra intenzione approfondire<sup>10</sup>, il filosofo invita ad identificare il «correlato della scienza naturale moderna»<sup>11</sup> non con il mondo della nostra quotidiana esperienza nella sua dimensione storico-socio-culturale, bensì con il mero «universo corporeo»<sup>12</sup> a cui si giunge per astrazione se si spogliano gli oggetti che lo abitano di qualsiasi predicato pratico e/o assiologico<sup>13</sup>. In altri termini, la riduzione del mondo culturale al mondo naturale è accessibile solamente a chi – consapevolmente o meno – opera «una specie di epochè»<sup>14</sup>, ovvero ripercorre idealmente all'indietro la serie di stratificazioni di senso implicite nelle cose di cui abbiamo comunemente esperienza fino a cogliere –

---

<sup>10</sup> Su questo tema si veda, ad esempio, P. Spinicci, *Problemi di filosofia della percezione*, CUEM, Milano, 2001, p. 238 e seg.

<sup>11</sup> E. Husserl (1952), *Idee per una fenomenologia pura e una filosofia fenomenologica*. Libro secondo: *Ricerche fenomenologiche sopra la costituzione (Idee II)*; Libro terzo: *La fenomenologia e i fondamenti delle scienze (Idee III)*, a cura di V. Costa e E. Franzini, Einaudi, Torino, 2002, p. 29.

<sup>12</sup> Id., *La crisi delle scienze europee*, cit., p. 501.

<sup>13</sup> Il mondo che ci circonda, sottolinea Husserl, ha infatti nella quotidianità un significato eminentemente pratico: «Davanti a me trovo le cose fornite di caratteri di valore, come di proprietà fisiche, belle e brutte, piacevoli e spiacevoli, gradite e sgradite, ecc. Le cose si presentano immediatamente come oggetti d'uso, la 'tavola', con i suoi 'libri', il 'bicchiere', il 'vaso', il 'pianoforte', ecc. Anche questi caratteri assiologici e pratici appartengono costitutivamente agli oggetti come tali, che io presti o non presti attenzione ad essi ed agli oggetti. E, come per le mere cose, ciò vale naturalmente anche per gli uomini e gli animali che mi circondano. Essi sono miei 'amici' o 'nemici', miei 'inferiori' o 'superiori', 'estranei' o 'parenti', ecc.». Id. (1913), *Idee per una fenomenologia pura e per una filosofia fenomenologica*, Libro primo: *Introduzione generale alla fenomenologia pura (Idee I)*, a cura di V. Costa e E. Franzini, Einaudi, Torino, 2002, p. 13.

<sup>14</sup> Id., *Idee II*, cit., p. 31.

attraverso l'esclusione progressiva dei significati pratico-culturali – lo strato della materialità spazio-temporale<sup>15</sup>. In questo senso, dunque, il correlato della fisica non è immediatamente dato, ma si pone come l'esito di una finzione metodica assimilabile agli esperimenti mentali proposti da Galileo. Come ci rammenta Husserl, infatti,

nella vita normale non abbiamo quasi mai a che fare con oggetti naturali. Quelle che noi chiamiamo cose sono per esempio dipinti, statue, giardini, case, tavoli, abiti, strumenti, ecc. tutte queste cose sono oggetti di valore di specie diversa, oggetti d'uso, oggetti pratici, ma non sono oggetti nel senso delle scienze naturali<sup>16</sup>.

La natura, infatti, non è “contenuta” nel mondo come suo sottoinsieme, ma come momento astratto che può emergere solo dall'impoverimento delle implicazioni di senso cui ogni cosa abitualmente rimanda proprio in virtù del suo provenire da un contesto mondano.

L'esplicitare questa operazione di “riduzione”, parte dell'agire irriflessivo dello scienziato/docente che la compie abitualmente, acquista per noi una sua portata di senso poiché ci permette di mettere a fuoco un fatto tutt'altro che trascurabile: lo scienziato può avere la natura come suo tema d'indagine solo assumendo un peculiare atteggiamento che consiste nel prescindere da qualsiasi altro significato culturale o legato alla propria personale esperienza, per intenzionare degli oggetti unicamente la forma spazio-temporale e le caratteristiche che li accomunano in quanto oggetti puramente materiali inseriti nella trama di relazioni causali che attraversa il mondo. Questo particolare atteggiamento rappresenta una condizione necessaria – benché non sufficiente – della possibilità di istituire nessi di somiglianza epistemica tra fenomeni percettivamente distinti e quindi, ad esempio, di accomunare uno sciatore che scende lungo la pista e una palla

---

<sup>15</sup> Ivi, paragrafo 11 e seguenti.

<sup>16</sup> Ivi, p. 31.

<sup>16</sup> Ivi, p. 14.

che rotola su una strada in discesa e di studiarli attraverso il modello del moto di un punto materiale lungo un piano inclinato.

È interessante notare come anche in questo caso ci si presenti una situazione dall'aspetto paradossale: da un lato, sia Koyré sia Husserl – sebbene attraverso percorsi teorici differenti – mostrano come questo atteggiamento mentale costituisca un presupposto logico della fisica moderna risultando – da un punto di vista costitutivo – un requisito preliminare alla costruzione di una rappresentazione idealizzata e matematizzata della realtà. Dall'altro, a causa della sua “innaturalità”, questo peculiare abito mentale non si forma spontaneamente attraverso gli apprendimenti informali quotidiani, ma – al contrario – si pone come esito di una temporanea<sup>17</sup> sospensione del nostro atteggiamento naturale verso cose ed eventi mondani. Di qui una sorta di “antinomia” didattica, simile a quella rinvenuta<sup>18</sup> nella soluzione proposta da Schecker, di cui i docenti devono farsi carico nella gestione dei processi traspositivi: l'apprendimento del modo matematico di rappresentare la realtà naturale richiede l'assunzione preliminare di un peculiare atteggiamento “selettivo” nei confronti della realtà culturale, atteggiamento che non è – a differenza di quanto ingenuamente si possa credere – immediatamente disponibile, ma costituisce esso stesso – batesonianamente parlando – un apprendimento di livello logico superiore in quanto parte del processo di mutamento di paradigma.

Passando al secondo presupposto sotteso alla possibilità di una fisica matematizzata emergono – secondo l'analisi sviluppata da Koyré – due ulteriori scogli cognitivi che si frappongono – ostacolandola – alla rappresentazione dello spazio reale in termini geometrici: l'idea di un cosmo ordinato, dove ogni cosa deve assumere la posizione che le spetta in base alla sua natura; il principio dell'*horror vacui* che, all'interno dell'economia

---

<sup>17</sup> Temporanea perché anche gli scienziati, quando smettono di interrogare teoreticamente la natura, riprendono le loro quotidiani abitudini, ovvero assumono nuovamente un atteggiamento naturale verso il mondo e le persone che lo abitano.

<sup>18</sup> Contraddizione che emerge come tale all'interno della prospettiva da noi assunta.

del pensiero aristotelico, lega indissolubilmente il concetto di spazio a quello di corporeità materiale. Lo spazio reale, per il filosofo greco così come per l'immaginario comune, esiste, infatti, in quanto luogo dei corpi concreti della nostra esperienza. Scrive Koyré interpretando il pensiero dello Stagirita:

Il vuoto è un *non-ens*; ed è assurdo porre degli oggetti in questo *nonens*. Solo corpi geometrici possono essere «posti» in uno spazio geometrico. Il fisico volge la sua ricerca su cose reali, il geometra ragiona su enti astratti. Perciò, conclude Aristotele, nulla può essere più dannoso di mischiare la geometria e la fisica e di applicare metodi e ragionamenti puramente geometrici allo studio della realtà fisica<sup>19</sup>.

Un modo per riformulare queste osservazioni così che possano fornire agli insegnanti un utile appiglio per interpretare le difficoltà degli studenti ce lo fornisce – seppur indirettamente – un appunto di Husserl, presumibilmente redatto tra il 1892 e il 1893, dal titolo *I molteplici significati del termine spazio*<sup>20</sup>. In questo scritto il filosofo, avvertendo l'esigenza di una chiarificazione concettuale delle differenti grammatiche relative alla spazialità, ne intraprende un'analisi genetica che lo conduce a distinguere lo spazio dell'intuizione<sup>21</sup> (*Raum des Alltagslebens oder der Anschauung*), dotato di una sua interna struttura e di leggi sue proprie indipendenti dall'operare della soggettività, dallo spazio geometrico (*Raum der reinen Geometrie*) e infine da quello delle scienze empiriche (*Raum der angewandten Geometrie*)<sup>22</sup>, entrambi frutto di un'elaborazione concettuale e pertanto di una spontanea attività da parte del soggetto. Questa tripartizione

---

<sup>19</sup> A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 223.

<sup>20</sup> E. Husserl (1892/3), «I molteplici significati del termine spazio», in Id., *Libro dello spazio*, a cura di V. Costa, Guerini, Milano, 1996, pp. 65-71.

<sup>21</sup> Con questo termine non s'intende solo lo spazio visivo, ma lo spazio dell'esperienza pratico-percettiva ovvero lo spazio precategoriale della vita quotidiana.

<sup>22</sup> Ne «I molteplici significati del termine spazio» il filosofo enuncia in verità quattro differenti tipi di spazio di cui l'ultimo sarebbe quello metafisico. Coerentemente con gli sviluppi successivi del suo pensiero ed essendo ininfluenza ai fini della nostra discussione, riteniamo però opportuno omettere questa quarta accezione.

assolve un ruolo ben preciso nell'economia del pensiero husserliano poiché, attraverso essa, il filosofo invita a ricordare come lo spazio, prima di trasformarsi in quel costrutto concettuale di cui è possibile parlare solo nel linguaggio della teoria in cui s'inserisce, è qualcosa di dato, qualcosa che si costituisce passivamente nella coscienza intersoggettiva insieme alle e attraverso le cose che in esso si manifestano. Ciò su cui vale la pena porre l'accento è quindi proprio il fatto che, nella sua primaria accezione, la nozione di spazialità è legata a doppio filo alle cose materiali della nostra quotidiana esperienza così come attestano gli esempi di impiego concreto delle parole afferenti all'area semantica del termine "spazio" messi a disposizione dal linguaggio ordinario. Pensiamo all'antitesi vuoto-pieno, ovunque presente nello spazio percepito, su cui richiama l'attenzione Giovanni Piana nelle sue riflessioni sul luogo<sup>23</sup> e sulle pratiche legate alla spazialità<sup>24</sup>:

– Se nulla viene incontrato dalle mani protese allora di fronte c'è il vuoto, e questo fatto significa semplicemente che posso andare avanti. Le mani protese non intendono toccare qualcosa, ad esempio, per conoscerla nelle sue proprietà tattili, ma sperimentano se in quella direzione si incontra la cosa che ora ha solo il senso di barriera e ostacolo al cammino. Cosa e spazio stanno qui l'una contro l'altra come il pieno e il vuoto<sup>25</sup>.

– "Vuoto" è una parola enigmatica se di essa tentiamo di farne fin dall'inizio un impiego oggettivo. Considera in che senso si può dire: il vuoto è condizione del movimento. Quando dico questo, *facendo riferimento al mio movimento*, so quello che dico. Se invece ci si chiede se esiste o non esista il vuoto, si avverte

---

<sup>23</sup> G. Piana, *La notte dei lampi: quattro saggi sulla filosofia dell'immaginazione*, cit., p. 243 e seg. «Lo spazio circostante è fatto di vuoti e di pieni, e là dove ci sono i pieni ci sono anche le cose». Ivi, p. 282.

<sup>24</sup> Id., *Frammenti epistemologici*, cit., p. 10 e seg. Scrive Piana: «Abbiamo una nozione quotidiana dello spazio? Intanto possiamo dire di avere una *pratica* della spazialità. Ciascuno di noi ha un "concetto" della spazialità, ovvero una *concezione implicata nelle pratiche*». Ivi, p. 10.

<sup>25</sup> Ivi, pp. 11-12.



oscuramente che il riferimento è cambiato, che la parola stessa tende ad avere un altro senso – che essa è entrata in un nuovo gioco linguistico<sup>26</sup>.

– Eppure Aristotele riteneva che l'esistenza del vuoto avrebbe impedito il movimento. Ecco un buon esempio di che cosa può accadere quando una parola, che viene impiegata secondo le pratiche che noi abbiamo con la realtà, entra in una teoria. Essa viene “concettualizzata”, ovvero *entra in una rete di concetti, da cui ormai dipende il suo senso*. La rete può essere talmente ampia da implicare un'intera concezione dell'Universo<sup>27</sup>.

Lo spazio percettivo si dà come antitesi di vuoti e di pieni, di spazi liberi e di spazi occupati da oggetti, e il linguaggio conserva in sé le tracce di questo ordinario stato di cose. In questo senso, il richiamo alla teoria aristotelica non ha lo scopo di mettere in luce una qualche concezione ingenua dei discenti: il vuoto aristotelico è già concettualizzato, situandosi all'interno di una teorizzazione più ampia che sfugge agli studenti; tuttavia, essa è comunque una teorizzazione che affonda le sue radici nello spazio della nostra concreta esperienza ed è questo il punto su cui è bene riflettere. La teoria aristotelica è, di fatti, una «teoria dello spazio attraverso una teoria del luogo»<sup>28</sup>, poiché il problema dello spazio si presenta in stretta connessione con quello della materia che lo occupa. Proprio perché la fisica, indagando la realtà, ha di mira lo studio dello spazio reale in cui si situano i corpi materiali, tale scienza, osserva Aristotele, a differenza della matematica, non ha a che fare con l'astratto bensì con il concreto. Non si possono, quindi, porre corpi reali in uno spazio ideale come quello geometrico.

Questa conclusione – sottesa a una vasta fenomenologia di misconcezioni, espressioni differenti di una medesima difficoltà<sup>29</sup> – intercetta un nodo problematico difficile da sciogliere prevalentemente per due ragioni: la prima è che, in certa misura, coglie nel segno. È vero che i corpi reali non

---

<sup>26</sup> Ivi, p. 12.

<sup>27</sup> *Ibidem*.

<sup>28</sup> G. Piana, «Riflessioni sul luogo», in *La notte dei lampi*, cit., pp. 243-283.

<sup>29</sup> Si rammentino, in particolare, i commenti degli studenti interrogati da Schecker per i quali rimandiamo a quanto esposto nel primo capitolo.

possono essere collocati in uno spazio ideale: sarebbe confondere la rappresentazione col rappresentato<sup>30</sup> o meglio sarebbe come rappresentare soltanto “a metà”. Ciò, tuttavia, non significa che non sia legittimo idealizzare lo spazio; significa semplicemente che occorre idealizzare anche gli oggetti che in quello spazio si collocano: nello spazio geometrico non si trovano sedie, tavoli, persone, ma punti materiali, corpi perfettamente rigidi, superfici prive di attrito ecc. che possono rappresentare, dietro l’istituzione di una relazione di somiglianza selettiva, quegli stessi oggetti in funzione di determinati scopi.

Sullo sfondo di questa premessa prende così forma il secondo tipo di ostacolo: la funzione rappresentazionale delle costruzioni teoriche nella scienza, ovvero il *gap* tra teoria ed esperienza. Il riconoscimento (non universale)<sup>31</sup> che la relazione tra sistemi idealizzati e sistemi empirici non è una relazione di isomorfismo ossia di perfetta coincidenza, ma al più una relazione di somiglianza che va giudicata in funzione di interessi ed obiettivi specifici, ha avuto una gestazione lunga e difficile – e possiamo dire non ancora conclusa – su cui è possibile riflettere proprio a partire dal caso esemplare della geometrizzazione dello spazio. L’avvento delle geometrie non euclidee<sup>32</sup>, sebbene inizialmente non abbia intaccato il ruolo paradigmatico assolto dal modello euclideo nella descrizione del *continuum* tridimensionale, ha di fatto contribuito a far sorgere, nel tempo, la

---

<sup>30</sup> Abbiamo già segnalato in precedenza come questa confusione sia ricorrente e diffusa.

<sup>31</sup> A proposito si rinvia a quanto esposto nel primo paragrafo del secondo capitolo.

<sup>32</sup> Le geometrie non euclidee sono quelle teorie geometriche che negano uno o più assiomi euclidei. Ad esempio, la geometria di Bolyai e Lobačevskij nega il V postulato, implicando l’esistenza di più parallele ad una retta data; quella sferica ideata da Riemann, caratterizzata dall’assenza di rette parallele, nega invece anche il II, in quanto esclude l’infinità della retta. La nascita di geometrie alternative a quella euclidea ritenuta per secoli la vera geometria dello spazio, sancendo la scissione tra spazio fisico e spazio geometrico, contribuisce al passaggio dalla concezione classica a quella moderna dell’assiomatica che distingue, all’interno di ciascuna teoria, l’aspetto puramente sintattico, concernente la costituzione del suo linguaggio, da quello propriamente semantico, relativo al reperimento di modelli che soddisfino i suoi assiomi. Per ulteriori ragguagli si rinvia a E. Agazzi, D. Palladino, *Le geometrie non euclidee e i fondamenti della geometria*, La scuola, Brescia, 1998.

consapevolezza di come il quesito sulla “vera” geometria dello spazio, ritenuto tautologico fino ai primi decenni del XIX secolo (se non oltre) sia intrinsecamente mal posto o comunque non contempi una risposta univoca. In particolare, con la codifica moderna del metodo assiomatico si è iniziato a distinguere la coerenza logica delle teorie geometriche dalla loro verità empirica ossia dalla loro adeguatezza nel descrivere lo spazio fisico. In questa seconda accezione, l'utilizzo di tale categoria valutativa per indicare il successo dell'attività rappresentazionale richiede, tuttavia, una certa cautela. La nozione di verità – osserva, infatti, Paul Teller<sup>33</sup> – non essendo soggetta alla relativizzazione secondo aspetti e gradi, possiede un valore assoluto – indipendente dal contesto – che la rende poco idonea ad esprimere la relazione tra rappresentazione matematica e rappresentato, sia esso lo spazio o qualche fenomeno che in quello spazio si colloca. A tal proposito scrive Teller:

For example, when we represent the motion of a pendulum with the function,  $x = A \sin(\omega t)$ , the formula does not represent the motion directly. The formula represents a function, perhaps understood as a collection of ordered pairs of values, that, when interpreted as representing times and angles of deflection, in turn represent the motion of the pendulum. The representation succeeds to the extent that the function and the course of values are similar in respects that are of current concern<sup>34</sup>.

Il successo della rappresentazione – come abbiamo già avuto modo di approfondire – non dipende, quindi, da un presunto accordo perfetto tra modello e sistema modellizzato, bensì dal rispetto delle condizioni di applicazione del modello che stabiliscono i limiti di accuratezza e precisione imposti dagli scopi che governano il suo impiego. Si pensi al caso della geometria: nelle normali costruzioni che non coinvolgono distanze di una

---

<sup>33</sup> P. Teller, «Representation in Science» in S. Psillos, M. Curd *The Routledge Companion to the Philosophy of Science*, Routledge, London, 2008, pp. 435-441.

<sup>34</sup> Ivi, pp. 435-436.

certa rilevanza gli ingegneri si avvalgono abitualmente della geometria euclidea, mentre, ad esempio, per stabilire le rotte aeree di viaggi a lunga percorrenza è necessario fare ricorso alla trigonometria sferica e quindi ad un modello di geometria non euclidea. Discorsi più complessi si potrebbero fare in relazione all'applicazione della geometria all'interno di teorie fisiche sofisticate quali, ad esempio, la meccanica quantistica o la relatività generale, come lascia già ipotizzare la tripartizione husserliana mettendo in evidenza la polisemia del termine spazio<sup>35</sup>.

Sull'equivocità di tale nozione e sulla conseguente necessità di una sua disambiguazione<sup>36</sup> si esprime – collocandosi, tuttavia, all'interno di una prospettiva teorica diversa – anche il fisico David Hestenes. Nel tentativo di riformulare in maniera completa e aggiornata gli assiomi newtoniani assunti come regole per la costruzioni di modelli teorici da sottoporre a validazione empirica<sup>37</sup>, Hestenes introduce – definendola «the Zeroth Law of Physics» – una legge tanto fondamentale da essere presupposta da ogni teoria scientifica senza, tuttavia, venire mai effettivamente esplicitata:

The Zeroth Law is the most universal of all scientific laws. It asserts that every real thing that ever existed or will exist has definite spatiotemporal properties, that is,

---

<sup>35</sup> A differenza di Kant, per il quale lo spazio “reale”, in quanto forma a priori della nostra esperienza, è governato dalle leggi euclidee, Husserl, con la sua tripartizione, non solo ammette la possibilità formale di geometrie alternative a quella di Euclide (dal punto di vista logico erano ammesse anche da Kant) ma perfino il loro eventuale utilizzo all'interno di teorie fisiche (E. Husserl, *Libro dello spazio*, cit., pp. 99-104). Come sottolinea Giovanni Piana, infatti, non solo lo spazio matematico ma anche quello della fisica «non è lo spazio di un'esperienza possibile», ma piuttosto «lo spazio pensato in connessione necessaria con il problema di una teoria della materia». Id., «Riflessioni sul luogo», cit., p. 275. Per un approfondimento sul tema dello spazio nella fisica si veda, ad esempio, V. Fano, «Verso una teoria integrata dello spazio», *Teorie & Modelli*, XII, 2007, pp. 33-59.

<sup>36</sup> D. Hestenes, *New foundations for classical mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NE), 1993, pp. 582-583.

<sup>37</sup> Scrive Hestenes: «The great game of science is modeling the real world, and each scientific theory lays down a system of rules for playing the game. The object of the game is to construct valid models of real objects and processes. Such models comprise the core of scientific knowledge. To understand science is to know how scientific models are constructed and validated. The main objective of science instruction should therefore be to teach the modeling game». Id., «Modeling Game in the Newtonian World», cit., p. 732.

definite spatiotemporal relations to every other real thing. Some aspect of the zeroth Law is presumed in every scientific theory and investigation<sup>38</sup>.

Dai tempi di Newton i concetti di spazio (fisico) e tempo (fisico) hanno subito due profonde revisioni di senso a cui, per ovvie ragioni, il linguaggio naturale è rimasto invece impermeabile: da un lato la distinzione tra “geometria matematica” e “geometria fisica” delineatasi in seguito alla rivoluzione non euclidea e alla pubblicazione dei *Fondamenti della geometria* di David Hilbert<sup>39</sup>; dall’altro l’esplicitazione, ad opera di Albert

---

<sup>38</sup> Id, *New foundations for classical mechanics*, cit., p. 583.

<sup>39</sup> D. Hilbert (1899), *Fondamenti della geometria*, a cura di C. F. Manara, Feltrinelli, Milano, 1970. La distinzione tra geometria matematica e geometria fisica compare chiaramente in uno scritto di Albert Einstein *Geometria ed esperienza* risalente al 1921. In questo scritto lo scienziato loda la nuova geometria assiomatica sostenendo che «il progresso raggiunto dall'assiomatica sta nel fatto che con essa si separa nettamente il contenuto logico-formale da quello empirico o intuitivo. [...] Questa concezione degli assiomi introdotta dalla moderna assiomatica depura la matematica da tutti gli altri elementi che non le appartengono, ed elimina così l'oscurità mistica, che prima circondava i fondamenti della matematica. Una tale concezione depurata rende tuttavia anche evidente che la matematica in quanto tale non è capace di dir nulla sia riguardo agli oggetti della rappresentazione intuitiva, sia riguardo agli oggetti della realtà. Per “punto”, “retta”, eccetera si devono intendere nella geometria assiomatica solo degli schemi concettuali privi di contenuto. Ciò che dà loro contenuto non appartiene alla matematica. La misurazione della terra riguarda le possibilità delle posizioni relative di dati corpi naturali, cioè di parti del corpo della terra, nastri metrici, aste metriche, eccetera. È chiaro che il sistema di concetti della geometria assiomatica da solo non può fare alcuna affermazione sul comportamento di siffatti oggetti della realtà, che designeremo come i corpi rigidi della pratica. Per poter fare tali asserzioni, la geometria deve essere spogliata del suo carattere esclusivamente logico-formale, in modo che i vuoti schemi concettuali della geometria assiomatica siano subordinati ai fatti sperimentabili della realtà. Per realizzare ciò, occorre solo aggiungere la legge:

i corpi solidi sono da considerarsi, rispetto alle loro possibili posizioni, come corpi della geometria tridimensionale euclidea. Quindi le proposizioni di Euclide contengono affermazioni sul comportamento di corpi praticamente rigidi. La geometria così completata è evidentemente una scienza naturale: in realtà possiamo considerarla come la più antica branca della fisica. Le sue affermazioni derivano essenzialmente da induzioni compiute sulla esperienza e non soltanto da deduzioni logiche. Chiameremo questa geometria completata “geometria pratica” e la distingueremo in seguito dalla “geometria puramente assiomatica”. Il problema se la geometria pratica dell'universo sia o no euclidea ha un chiaro significato e solo l'esperienza può rispondervi. In fisica, tutte le misurazioni di lunghezza sono, in questo senso, geometria pratica, come le misurazioni di lunghezze geodetiche ed astronomiche, e si utilizza la legge empirica che la luce si propaga in linea retta e quindi in linea retta nel senso della geometria pratica. Alla concezione qui descritta della geometria attribuisco un significato particolare, perché senza di essa non sarebbe possibile fondare la teoria della relatività». A. Einstein, (1921), «Geometria ed esperienza» in Id., *La relatività: esposizione divulgativa e altri saggi*, tr. it. a cura di G. Testa, Newton

Einstein, del concetto di simultaneità a distanza<sup>40</sup>. Proprio tale mutamento di paradigma – che segna il passaggio dalla fisica classica a quella moderna – impone, secondo Hestenes, di formulare esplicitamente le leggi generali dello spazio e del tempo le quali, tacitamente assunte, raramente compaiono nella formulazione di un modello nonostante forniscano le basi teoriche per le misurazioni di lunghezza, tempo e movimento<sup>41</sup>. Di qui l'introduzione della “legge zero”, così denominata poiché si pone a fondamento di tutte le misurazioni fisiche all'interno del mondo concettuale newtoniano che – come ricorda lo scienziato rifacendosi ai capisaldi dell'epistemologia costruttivista – deve essere mantenuto ben distinto dal mondo fisico e dalle misurazione che lì vi si effettuano.

Newtonian theory, like every other scientific theory, defines a *Conceptual World*. This world is populated with conceptual models of real objects and processes in the *Physical World*. A sharp distinction should be maintained between the Newtonian World and the Physical World it characterizes. Many students and textbooks fail to do this. Consequently, it is widely believed that Newton's Laws are inherent in the Physical World, just waiting to be discovered, like Columbus discovered America.

---

Compton, Roma 1970, pp. 137-156, in particolare pp. 137-139. Per ulteriori approfondimenti a riguardo si rinvia a C. Mangione, S. Bozzi, *Storia della logica. Da Boole ai nostri giorni*, Garzanti, Milano 1993, p. 21 e seg.

<sup>40</sup> Scrive Hestenes: «The second major improvement in concepts of space and time is due mainly to Einstein. He recognized that the concept of *distant simultaneity* is an essential part of the time concept which had not previously been explicitly defined in classical physics. Rather, physicists had unwittingly adopted an implicit concept of simultaneity which was inconsistent with ideas of causality and experimental fact. By supplying an appropriate definition of distant simultaneity and analyzing its consequences, Einstein created his Special Theory of Relativity. Thus, the Special Theory is best regarded as a completion of classical physics with a full elucidation of the time concept». D. Hestenes, *New foundations for classical mechanics*, cit., p. 583.

<sup>41</sup> La legge zero, sostiene Hestenes, è tacitamente data per scontata nei libri di testo convenzionali, probabilmente per la ragione storica che Newton e i suoi contemporanei non l'hanno considerata una legge fisica. D'altro canto l'ambiguità che a quei tempi avvolgeva i fondamenti della geometria nonché l'assunzione – comprensibilmente – aproblematica del concetto di simultaneità non lasciavano presagire le svolte successive. Oggi, tuttavia, dopo che Einstein ha mostrato come la deficienza nel sistema newtoniano risiedeva proprio nella legge zero, non ci sono scusanti per ometterla. Id., «Modeling Game in the Newtonian World», cit., in particolare pp. 733-735.

On the contrary, as Einstein<sup>42</sup> repeatedly emphasized, the laws of physics are “free creations of the human mind”<sup>43</sup>.

La netta distinzione tra mondo fisico e mondo concettuale difesa dall’epistemologia costruttivista a cui è assimilata la posizione einsteiniana si riflette oggi, alla luce degli sviluppi che la disciplina ha conosciuto nel corso dei secoli, nel diverso tipo di lavoro svolto dai fisici teorici e dai fisici sperimentali: il teorico costruisce matematicamente il mondo concettuale (il mondo del possibile) popolandolo di famiglie di modelli rappresentazionali, mentre lo sperimentista esplora il mondo fisico (il mondo reale) per costruire modelli dei dati i quali – come sottolinea Maria Carla Galavotti commentando Suppes –, «esibendo una certa struttura statistica del fenomeno sotto osservazione»<sup>44</sup>, assolvono la duplice funzione di convalidare i modelli teorici nonché, vincolando le alternative possibili, di suggerire indirettamente la loro costruzione. Questa distinzione, concordiamo con Hestenes, non è tuttavia ben chiara agli studenti i quali, per “esigenze didattiche”, si trovano spesso ad alternare problemi riferiti a situazioni idealizzate che simulano esperimenti mentali (ad esempio, gli esercizi riportati nei manuali) con attività sperimentali di laboratorio, senza tuttavia possedere le coordinate di riferimento necessarie per afferrare il senso di queste due componenti complementari dell’impresa scientifica<sup>45</sup>.

A questo riguardo è interessante rilevare come l’opposizione tra epistemologia costruttivista ed epistemologia positivista, riproponendo in una nuova veste lo storico attrito tra razionalismo ed empirismo – attrito che si manifesta anche attraverso le differenti interpretazioni del connubio

---

<sup>42</sup> A. Einstein, L. Infeld (1938), *L’evoluzione delle fisica. Sviluppo delle idee dai concetti iniziali alla relatività e ai quanti*, a cura di C. Castagnoli, Bollati Boringhieri, 2007.

<sup>43</sup> Ivi, p. 734.

<sup>44</sup> M. C. Galavotti, «On Patrik Suppes’ philosophy of science», cit..

<sup>45</sup> Si rammentino a tal proposito anche le considerazioni di Matthews. Id., «Learning about Scientific Methodology and the “Big Picture” of Science: The Contribution of Pendulum Motion Studies», cit., in particolare p. 208 e seg.

galileiano tra «sensate esperienze» e «certe dimostrazioni» – , intercetti, sul piano didattico, il problema di concertare sapientemente istanze di tipo sperimentale e istanze di tipo teorico, al fine di favorire nei discenti una reale comprensione di come il rapporto tra teoria e realtà richieda un’intera gerarchia di modelli caratterizzati da un differente livello di astrazione. L’adesione ad una didattica critica capace di far convivere questo duplice volto della disciplina così da veicolare un’immagine epistemologicamente adeguata e pedagogicamente accessibile si traduce, quindi, all’interno della nostra prospettiva, nella ricerca degli ostacoli epistemologici che hanno condotto e che tuttora conducono ad interpretazioni parziali ed unilaterali dell’attività scientifica galileiana, alcune fortemente connotate sul versante intellettualistico, come la lettura platonizzante offerta da Koyré, altre orientate empiricamente come quella neopositivista di Mach e Whewell. Continuando ad interrogare la storia in chiave epistemologica ci soffermeremo brevemente su queste due contrapposte interpretazioni che, sotto forma di filosofie implicite, influenzano tacitamente le modalità di trasposizione didattica dei contenuti, per poi cercare, attraverso il saggio di Noretta Koertge<sup>46</sup>, d’identificare il nodo problematico all’origine di tale *impasse*.

### 3. Il “gap” tra teoria ed esperienza: il problema degli “accidenti”

Secondo la sintetica tipologia di profili abbozzata da Paolo Rossi<sup>47</sup> – che già dal suo emblematico titolo *Ci sono tanti Galilei?* invita a rifiutare sterili

---

<sup>46</sup> N. Koertge, «Galileo and the Problem of Accidents», *Journal of the History of Ideas*, 38 (3), 1977, pp. 389-408.

<sup>47</sup> P. Rossi, «Ci sono molti Galilei?», in *Un altro presente. Saggi sulla storia della filosofia*, il Mulino, Bologna, 1999, pp. 133-143, in particolare pp. 135-137. Questa breve tipologia di profili, senza alcuna pretesa di completezza, si prefigge come unico fine quello di evidenziare come quest'autore, figura di confine tra vecchio e nuovo mondo, abbia suscitato interpretazioni discordanti, talvolta in forte antitesi, a seconda di quale delle sue molteplici



schematizzazioni a favore di una più articolata interpretazione dell'agire scientifico, maggiormente aderente alla natura "ecologica" del sapere – il Galileo di Ernst Mach<sup>48</sup> e William Whewell<sup>49</sup> incarna perfettamente il paradigma positivista. Fondatore del metodo scientifico, è il grande osservatore che, scevro da idee preconcepite, si basa rigorosamente sull'esperienza esaminandone minuziosamente i fatti al fine di ricavarne leggi generali.

Affine e complementare al ritratto empirista dei neopositivisti è il profilo restituitoci da Stillman Drake: nella sua biografia scientifica si racconta, infatti, di uno scienziato dedito alla ricerca empirico-sperimentale che svolge scrupolosamente attraverso l'attenta osservazione dei fenomeni e la misurazione quantitativa delle grandezze fisiche in essi coinvolte. Fortemente contrario all'interpretazione idealistica di Koyré, che tenta di confutare scandagliando scrupolosamente gli inediti galileiani, Drake antepone l'effettiva rilevanza della pratica di laboratorio al momento teorico e speculativo<sup>50</sup>.

---

sfaccettature si sia voluta di volta in volta privilegiare. Contro interpretazioni unilaterali e riduttive dell'opera galileiana si esprime anche Fabio Minazzi. Id., *Galileo "filosofo geometra"*, Rusconi, Milano, 1994, p. 196 e seg.

<sup>48</sup> E. Mach (1883), *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, trad. it. a cura di A. D'Elia, Boringhieri, Torino, 1992.

<sup>49</sup> W. J. Whewell (1840), *The philosophy of the inductive sciences: founded upon their history*, Routledge/Thoemmes, London, 1996.

<sup>50</sup> Un altro studioso che nega plausibilità all'interpretazione platonica sostenuta da Koyré è Ludovico Geymonat, sostenitore di una lettura dell'opera galileiana scevra da qualsiasi pregiudiziale di tipo filosofico. Sottolineando la distanza del pensiero galileiano sia dalla metafisica aristotelica sia da quella platonica, Geymonat rivendica quale peculiarità dello stile del pisano la perfetta compresenza di ragione ed esperienza, sostenendo come la ricerca sperimentale e quella razionale non costituiscano due procedimenti distinti, ma due fasi di un unico metodo di ricerca che riconosce proprio in questo connubio il merito del suo enorme successo. Profondamente contrario all'interpretazione in chiave metafisica della metafora galileiana del «gran libro della Natura scritto in caratteri matematici», il filosofo torinese argomenta a favore dell'assoluto carattere funzionale del linguaggio matematico, i cui concetti non vanno ipostatizzati bensì compresi nel loro ruolo di strumenti rappresentazionali. La medesima posizione antiplatonica concerne anche il ruolo riconosciuto da Geymonat ai cosiddetti esperimenti mentali: tali espedienti, infatti, si rivelano di grande utilità nell'indagine naturale proprio perché non rappresentano delle mere deduzioni logiche, puro parto della ragione, bensì delle specie di simulazioni immaginative che, subentrando come ausilio alla ricerca, ampliano le possibilità di

Completamente differente è invece l'immagine dello scienziato che ci consegna Koyré: sin dalle prime battute del suo scritto dedicato a *Galileo e Platone* – dove vengono riprese e approfondite le tesi esposte preliminarmente nei saggi confluiti negli *Studi galileiani* – l'autore mostra una forte avversione nei confronti di qualsiasi lettura tesa ad appiattare la «rivoluzione spirituale del XVI secolo»<sup>51</sup> sul rinnovato interesse per la dimensione pratico-empirica che trova la sua origine negli ambienti tecnici<sup>52</sup>. «La scienza», sostiene Koyré, «è innanzitutto teoria e non raccolta di “fatti”»<sup>53</sup>; al suo sviluppo, pertanto, non possono contribuire tecnici e ingegneri, ma unicamente teorici e filosofi, ovvero uomini che come Galilei e Cartesio «raramente hanno costruito o prodotto qualcosa di più reale di una teoria»<sup>54</sup>.

Queste letture antitetiche – che certo non esauriscono lo spettro di interpretazioni ispirate dalla poliedrica personalità di Galileo, per le quali rinviando al saggio di Paolo Rossi – sono il sintomo, secondo Koertge, della mancata contestualizzazione delle speculazioni (talvolta, in effetti,

---

sperimentazione oltre i limiti empirici che impediscono la realizzazione di esperimenti reali. Di qui la concezione operativa della conoscenza e della ricerca che contraddistingue l'attività scientifica di Galileo, concezione che prefigura la possibilità di un controllo e di un dominio dell'uomo sulla natura. A questo proposito si rinvia a L. Geymonat, «Introduzione», in G. Galilei, *Sensate esperienze e certe dimostrazioni*, antologia a cura di F. Brunetti, L. Geymonat, Laterza, Bari, 1961, pp. 5-37, in particolare pp. 14-15, p. 19 nota 15, p. 22 e p. 30.

<sup>51</sup> A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 212.

<sup>52</sup> Questa posizione trova invece un'ampia eco nell'interpretazione di Galileo avanzata da Geymonat, il quale rivendica l'influenza esercitata sulle opere giovanili dello scienziato pisano dall'ambiente degli ingegneri italiani e dall'amico di famiglia Ostilio Ricci. Allievo di Nicolò Tartaglia, dal quale apprese a considerare la matematica nella sua veste pratica applicandola a lavori d'architettura e ingegneria, Ricci trasmise quegli stessi insegnamenti al giovane Galileo che li impiegò proficuamente soprattutto nei suoi studi nel campo della meccanica. Da ciò deriverebbe il profondo interesse nutrito da Galilei per le ricadute tecnologiche delle scoperte scientifiche, interesse che, secondo Geymonat, alimenta nel pisano una concezione utilitaria della scienza nonché una visione pragmatica della matematica assunta come strumento principe per la risoluzione di problemi concreti e di interesse pratico. L. Geymonat, «Introduzione», in G. Galilei, *Sensate esperienze e certe dimostrazioni*, cit., in particolare pp. 31-34. Sul valore e il significato della tecnica nella scienza galileiana si veda inoltre F. Minazzi, *Galileo “filosofo geometra”*, cit., pp. 232-233, p. 273 e seg.

<sup>53</sup> A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 209, nota 1.

<sup>54</sup> Ivi, p. 208.

equivoco) del pisano alla luce dell'evoluzione del suo modo di affrontare ciò che, in gergo tecnico, viene definito il “problema degli accidenti”. Ad impedire il perfetto accordo tra teoria ed esperienza sono, infatti, le differenti forme di «impedimenti» che, ripartiti in tre distinte categorie – fisici, matematici e osservazionali<sup>55</sup> – corrispondono ai diversi tipi di ostacoli epistemologici con cui Galileo ha dovuto scontrarsi per poter costruire, ispirandosi all'opera di Archimede, rappresentazioni idealizzate non solo dello spazio reale, ma anche degli oggetti e dei processi che in quello spazio si collocano.

La questione del difficile e articolato rapporto tra il piano astratto delle teorizzazioni e quello concreto dell'esperienza – alla cui mancata comprensione, abbiamo visto, si accompagna un ampio ventaglio di misconcezioni – necessita, dunque, di essere disambiguata e affrontata a partire proprio da questi ostacoli: alla ricerca di tecniche e soluzioni sempre più sofisticate nel tentativo di superarli si lega, infatti, la “genesì” delle pratiche epistemiche implicate nell'attività di modellizzazione. Prima, tuttavia, di prendere singolarmente in esame ciascuna specifica categoria con prassi teoriche annesse, ripercorriamo sinteticamente le tappe in cui Koertge scandisce l'evoluzione dei metodi galileiani per «difalcare gli impedimenti della materia»: l'intento è mostrare come, se risolta unilateralmente in un senso o nell'altro, la tensione dialettica tra piano ideale e piano empirico intrinseca al pensiero scientifico conduca a posizioni di razionalismo o empirismo ingenuo. Al contrario, le sofisticate prassi epistemiche della scienza moderna richiedono un complesso equilibrio dinamico tra ragione ed esperienza, equilibrio a cui Galileo perviene solo nella fase matura della sua attività dopo essersi confrontato –

---

<sup>55</sup> Con impedimenti fisici s'intendono gli attriti, la resistenza dell'aria, le irregolarità sulle superfici dei corpi, ecc.; gli accidenti matematici si riferiscono invece alla discrepanza che sussiste tra l'approssimazione matematica e la situazione reale (ad esempio, descrizione geometrica della forma di un oggetto fisico vs forma reale dell'oggetto). Gli accidenti osservazionali, in ultimo, riguardano le difficoltà che impediscono una corretta e precisa percezione dei fatti. N. Koertge, «Galileo and the Problem of Accidents», cit., pp. 391-392.

in svariati contesti e adottando di volta in volta strategie differenti – proprio con il problema degli “accidenti”. Scrive, a questo riguardo, la filosofa:

Because of physical, observational, and mathematical accidents, we do not find nor expert to find an exact match between ideal, simple scientific laws and what we actually observe. How then can we use experience to appraise our proposed scientific theories?<sup>56</sup>

Al quesito epistemologico lungo cui si sviluppa il saggio – il quale, dischiudendo un’insolita prospettiva da cui affrontare il problema, rappresenta anche un’efficace modalità di trasposizione del sapere idonea a trasformare un apprendimento trasmissivo in uno costruttivo<sup>57</sup> – è possibile fornire tre differenti risposte che, se lette da un’angolazione pedagogico-didattica, ricapitolano in parte alcune posizioni diffuse tra gli studenti. La prima è la risposta fornita dal Simplicio del *Dialogo*<sup>58</sup> che nega legittimità alla fisica matematizzata in quanto produce risultati non confermati dall’esperienza sensibile. La seconda proviene da Guidobaldo Del Monte, “l’empirista pedante” che rifiuta di ricercare semplici leggi ideali per concentrarsi invece sulla descrizione matematica di ogni singolo aspetto e dettaglio degli stati di cose reali. L’ultima alternativa, di evidente ascendenza platonica, contempla invece la possibilità di ignorare l’esperienza e immaginare come sarebbe il mondo se tutti gli accidenti fossero eliminati. Assumendo queste tre opzioni come sfondo, riproponiamo ora sinteticamente gli stadi in cui Koertge articola l’evoluzione galileiana nella modalità di gestione degli effetti perturbativi che adombrano all’occhio inesperto le grandezze fondamentali responsabili del fenomeno sotto osservazione.

---

<sup>56</sup> N. Koertge, «Galileo and the Problem of Accidents», cit., p. 392.

<sup>57</sup> Sul problema come dispositivo metodologico si veda B. Martini, *Formare ai saperi*, cit., pp. 81-88.

<sup>58</sup> G. Galilei (1632), *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano*, a cura di L. Sosio, Einaudi, Torino, 1970.

Riferendosi in particolare a *La Bilancetta* (1586) e al *De Motu dialogus* (1590), la studiosa nota come gli scritti risalenti al periodo iniziale della produzione giovanile<sup>59</sup> attestino l'incondizionata fiducia di Galileo nella possibilità di fondare direttamente sull'esperienza una scienza matematica della natura concepita come un sistema di proposizioni quantitative, conseguenze logiche di assiomi immediatamente accessibili ai sensi. Durante questo stadio di "innocenza epistemica", lo scienziato – totalmente concentrato sulla ricerca delle vere leggi quantitative da cui è governata la natura – appare pertanto inconsapevole dell'impossibilità di collegare direttamente, senza alcun genere di mediazione, teoria ed esperienza.

Nella fase successiva che vede la stesura del *De Motu* (1590) e de *Le Meccaniche* (1593)<sup>60</sup>, il pisano inizia ad avvertire se non l'inattuabilità almeno la problematicità di un simile progetto. Nel trattato sul moto, dopo aver formulato la legge di caduta dei gravi, Galilei afferma infatti che le previsioni della sua teoria non possono essere confermate empiricamente: la teoria contiene necessariamente idealizzazioni, distorce cioè la realtà così da semplificarla e renderla accessibile a una trattazione matematica; non ci si deve sorprendere, pertanto, che gli esperimenti falliscano nel dimostrarla. È la fase platonico-razionalista in cui predomina il Galileo teorico. Rigettata l'ipotesi avanzata da Guidobaldo di abbandonare le leggi ideali, l'iniziale soluzione al problema si configura come un tentativo di rimuovere mentalmente gli accidenti stilandone un elenco completo per poi immaginare cosa accadrebbe se fossero assenti, azzardando un ragionamento di tipo controfattuale<sup>61</sup>.

---

<sup>59</sup> N. Koertge, «Galileo and the Problem of Accidents», cit., p. 394.

<sup>60</sup> *Ibidem*.

<sup>61</sup> Il condizionale controfattuale – ad esempio “se i corpi non avessero subito alcun genere di resistenza esterna, allora sarebbero caduti tutti alla medesima velocità” – è un «tipo di condizionale che esprime il periodo ipotetico dell'irrealtà, ovvero in cui il realizzarsi di un evento B è subordinato al realizzarsi di un evento A, il quale non si è di fatto realizzato [...]». A differenza del condizionale materiale, si tratta di un connettivo non vero-funzionale, dal momento che la sua verità non dipende esclusivamente dal valore di verità del suo antecedente e del suo conseguente (in tal caso esso risulterebbe un condizionale

Nella terza fase a cui appartengono i testi redatti tra il 1610 e il 1613 – tra cui ricordiamo il *Sidereus Nuncius* (1610) e il *Discorso intorno alle cose che stanno in sull'acqua* (1612)<sup>62</sup> – si assiste, invece, al primo tentativo di Galileo di approssimare condizioni ideali sperimentalmente attraverso la riduzione e, ove possibile, la quasi totale eliminazione di eventuali effetti perturbativi. In questo stadio della sua maturazione scientifica, all'immaginazione del teorico si sostituiscono le abilità tecniche dello sperimentista che cerca di escogitare stratagemmi per rimuovere fisicamente – e non più solo mentalmente – gli «impedimenti della materia». Alla soluzione trovata per arginare gli “accidenti fisici” nello studio dei fenomeni terrestri si aggiunge, inoltre, la giustificazione adottata in campo astronomico per semplificare i calcoli, ignorando, sull'esempio di Archimede, gli accidenti matematici qualora piccoli e irregolari. Le approssimazioni matematiche<sup>63</sup>, precedentemente assunte senza essere adeguatamente motivate, vengono ora legittimate con argomenti di natura quantitativa basati sia sull'irrelevanza dell'errore introdotto – che pertanto non incide significativamente sul risultato finale – sia sulla sua esatta calcolabilità<sup>64</sup>.

---

sempre vero, dal momento che l'antecedente è sempre falso)». D. Palladino, C. Palladino, *Breve dizionario di logica*, cit., p. 27. Sul ragionamento controfattuale si veda anche F. Coniglione, *Introduzione alla filosofia della scienza: un approccio storico*, Bonanno, Acireale, 2004. Interessanti osservazioni sull'uso galileiano dei controfattuali si trovano in L. Nowak, «Remarks on the nature of Galileo's methodological revolution», in M. Kuokkanen (a cura di), *Idealization VII: Structuralism, Idealization and Approximation*, Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities, 42, Rodopi, Amsterdam/Atlanta, 1995, pp. 111-126.

<sup>62</sup> L'avvento di questa nuova fase, nota Koertge, è tuttavia in parte già preannunciata da qualche passo de *Le Meccaniche*, in cui l'autore si riferisce a situazioni reali che in qualche modo approssimano quelle ideali come nel caso di laghi ghiacciati o sfere di marmo perfettamente lucide. Id., «Galileo and the Problem of Accidents», cit., pp. 399-340.

<sup>63</sup> Approssimazioni compiute, ad esempio, equiparando brevi archi di cerchio a segmenti di retta. Ivi, p. 401.

<sup>64</sup> L'errore dovuto ad approssimazioni matematiche, infatti, può essere in linea di principio calcolato, a differenza di quello dovuto al trascurare gli impedimenti fisici per il quale invece non si è ancora escogitato alcun metodo opportuno.

Nel quarto stadio – risalente agli anni in cui compone il *Saggiatore* (1623) e il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632) – Galileo fornisce due ulteriori importanti contributi al processo di matematizzazione della fisica. Il primo, occasionato dai risultati delle misurazioni astronomiche relative alla “nuova stella” del 1572, concerne una sofisticata analisi dell’errore sperimentale dovuto ad “accidenti osservazionali”. Nella Terza Giornata del *Dialogo*, Galileo si rivolge polemicamente contro lo scritto dell’astronomo scolastico Scipione Chiaramonti (*De tribus novis stellis quae annis 1572, 1600, 1604 comparuere*), il quale – sulla base di risultati ottenuti dalla combinazione di alcuni calcoli effettuati da 13 astronomi – sosteneva che la distanza della stella dalla Terra fosse minore della distanza Terra-Luna<sup>65</sup>. Imputando questa scorretta conclusione non a un errore sistematico<sup>66</sup> nel procedimento adottato, bensì ad errori accidentali, Galileo – per bocca di Salviati – intavola una discussione sull’organizzazione razionale dei dati, sui criteri della loro valutazione e selezione nonché sulla possibilità di eliminare quelli che conducono a soluzioni fisicamente impossibili<sup>67</sup>. Proprio in questa fase inizia a delinearsi il delicato equilibrio tra rilevazione empirica e sistemazione razionale dei dati grezzi: questi ultimi – come abbiamo messo in evidenza a proposito della costruzione dei modelli dei dati – non sono immediatamente utilizzabili, ma richiedono di

---

<sup>65</sup> R. Gigli, «Galileo e i calcoli sulla nova del 1572: Un’anticipazione della legge di Gauss nel *Dialogo sui massimi sistemi*», in P. Tucci (a cura di), *Atti del XVI Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell’Astronomia, Centro Volta, Villa Olmo, Como, 24-25 maggio 1996*, Gruppo di lavoro per le celebrazioni voltiane, Como, 1996, disponibile anche all’indirizzo Internet: <http://www.brera.unimi.it/sisfa/atti/1996/gigli.html>.

<sup>66</sup> Gli errori sistematici non nascono soltanto dall’uso di strumenti difettosi, ma anche dalla maniera in cui è condotta la misura; differentemente gli errori accidentali (detti anche casuali) non si possono né prevedere né evitare e affliggono la misura con valori che possono risultare a volte minori e a volte maggiori di quelli reali.

<sup>67</sup> Sull’acume delle argomentazioni galileiane si esprime anche Rossella Gigli, la quale sostiene come la sensibilità nei confronti del «problema dell’errore scientifico» conduca lo scienziato ad elaborare una soluzione che, sebbene rappresenti solamente lo «stadio intuitivo della legge sugli errori d’osservazione», può considerarsi a buon diritto un’anticipazione della legge di Gauss. R. Gigli, «Galileo e i calcoli sulla nova del 1572: Un’anticipazione della legge di Gauss nel *Dialogo sui massimi sistemi*», in P. Tucci (a cura di), *Atti del XVI Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell’Astronomia*, cit.

essere analizzati statisticamente e interpretati alla luce delle conoscenze teoriche e contestuali che intervengono nell'osservazione e/o nella sperimentazione che li ha prodotti. La corrispondenza aproblematica tra teoria ed esperienza ha ormai ceduto il passo a un rapporto molto più articolato che prelude all'esigenza – avvertita esplicitamente solo molto più tardi – di costruire un'intera gerarchia di modelli quale ponte necessario tra mondo concettuale e mondo reale.

Il secondo contributo concerne, invece, la giustificazione delle idealizzazioni introdotte nella teoria qualora gli effetti prodotti dagli accidenti (da ora chiamati cause secondarie) siano comparabili a quelli prodotti dalle cause primarie. È questo il caso delle maree, dove le cause secondarie non possono essere eliminate sperimentalmente e la loro influenza è troppo rilevante perché possa essere trascurata senza introdurre un errore significativo a cui, in qualche modo, è necessario porre rimedio. Ne consegue un duplice ordine di considerazioni che troveranno pieno compimento solo nell'ultimo periodo di attività dello scienziato pisano. Da un lato un passo importante per il progresso metodologico della scienza: a volte è necessario prescindere non solo dai fattori che interferiscono marginalmente, ma anche da quelli che producono interferenze significative. In questo senso, la teoria meno idealizzata non è necessariamente la migliore: nel caso della caduta dei gravi, ad esempio, solo prescindendo dagli effetti perturbativi causati dalla resistenza del mezzo – spesso tutt'altro che trascurabili – è possibile individuare le condizioni sufficienti e necessarie affinché il fenomeno si produca. Questo delicato aspetto – per il quale vale ciò che abbiamo esposto nel secondo capitolo in merito alla distinzione tra spiegazione e previsione – dovrebbe essere maggiormente soppesato dai docenti nel processo di “messa in forma didattica” del sapere. Eloquente infatti è l'incapacità, da parte degli studenti, di motivare adeguatamente il ricorso a modelli idealizzati nell'indagine dei fenomeni empirici: laddove non vengano totalmente rifiutati, la giustificazione



pragmatica della loro semplicità matematica finisce quasi sempre per oscurare la dimensione concettuale concernente il diverso ruolo delle grandezze che vi intervengono.

Accanto a questo primo ordine di considerazioni inizia inoltre a farsi strada, nella mente di Galileo, la flebile ipotesi di poter calcolare gli effetti dovuti alle cause secondarie<sup>68</sup>, ipotesi che guadagnerà concretezza – sebbene non senza difficoltà – solamente nel suo ultimo capolavoro *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. In quest'opera, infatti, che corrisponde al quinto stadio dell'evoluzione galileiana prospettataci dalla Koertge, lo scienziato porta gradualmente a maturazione un metodo potente e sofisticato per gestire anche le forme più insidiose di “accidenti”, metodo che indica la via per una possibile conciliazione – epistemologica e didattica – tra posizioni razionaliste ed empiriste. Per comprendere meglio questo delicato passaggio citiamo direttamente le parole di Galileo che, attraverso il dibattito tra Simplicio e Salviati, chiarisce le clausole *ceteris paribus* in virtù delle quali la legge di caduta dei gravi può essere applicata, spiegando come essa valga unicamente in assenza di impedimenti esterni ovvero nel vuoto:

---

<sup>68</sup> Così si esprime Galilei: «Questo è quanto io posso dirvi in questa materia e quanto per avventura può comprendersi sotto una nostra cognizione, la quale, come ben sapete, non si può aver se non di quelle conclusioni che son ferme e costanti, quali sono i tre periodi in genere de' flussi e reflussi, come quelli che dependono da cause invariabili, une ed eterne. Ma perché con queste cagion primarie ed universali si mescolano poi le secondarie e particolari, potenti a far molte alterazioni, e sono, queste secondarie, parte inosservabili ed incostanti, qual è, per esempio, l'alterazion de i venti, e parte, benché determinate e ferme, non però osservate per la loro molteplicità, come sono le lunghezze de i seni, le loro diverse inclinazioni verso questa o quella parte, le tante e tanto diverse profondità dell'acque; chi potrà, se non forse doppio lunghissime osservazioni e ben sicure relazioni, formarne istorie così spedite, che possano servir come ipotesi e supposizioni sicure a chi volesse con le lor combinazioni render ragioni adequate di tutte le apparenze, e dirò anomalie e particolari difformità, che ne i movimenti dell'acque possono scorgersi? Io mi contenterò d'avere avvertito come le cause accidentarie sono in natura, e son potenti a produr molte alterazioni: le minute osservazioni le lascerò fare a quelli che praticano diversi mari[...]». Id., *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano*, cit., pp. 543-544. Su questo punto si veda anche E. McMullin, «Galilean idealization», cit.

*Salv.* Or sia questa, in grazia del Sig. Simplicio, la soluzione del nostro dubbio: e lasciato il digredire, torniamo al nostro proposito. Veduto come la differenza di velocità, ne i mobili di gravità diverse, si trova esser sommamente maggiore ne i mezzi più e più resistenti; ma che più? nel mezzo dell'argento vivo l'oro non solamente va in fondo più velocemente del piombo, ma esso solo vi scende, e gli altri metalli e pietre tutti vi si muovono in su e vi galleggiano, dove che tra palle d'oro, di piombo, di rame, di porfido, o di altre materie gravi, quasi del tutto insensibile sarà la disegualità del moto per aria, ché sicuramente una palla d'oro nel fine della scesa di cento braccia non preverrà una di rame di quattro dita; veduto, dico, questo, cascai in opinione che se si levasse totalmente la resistenza del mezzo, tutte le materie scenderebbero con eguali velocità.

*Simp.* Gran detto è questo, Sig. Salviati. Io non crederò mai che nell'istesso vacuo, se pur vi si desse il moto, un fiocco di lana si movesse così veloce come un pezzo di piombo<sup>69</sup>.

All'incredulità di Simplicio – tutt'altro che ingiustificata se ci si attiene, come vuole la *Weltanschauung* aristotelica, all'immediatezza dell'esperienza – Galileo risponde cercando, a partire da uno sfondo comune di osservazioni empiriche condivise, di insegnare all'aristotelico a guardare i fatti dell'esperienza secondo una nuova *Gestalt*, ovvero nella direzione non di una loro generalizzazione induttiva bensì di un'estrapolazione al caso limite<sup>70</sup>.

*Salv.* Pian piano, Sig. Simplicio: la vostra difficoltà non è tanto recondita, né io così inavveduto, che si debba credere che non mi sia sovvenuta, e che in conseguenza io non vi abbia trovato ripiego. Però, per mia dichiarazione e vostra intelligenza, sentite il mio discorso. Noi siamo su 'l volere investigare quello che accaderebbe a i mobili differentissimi di peso in un mezzo dove la resistenza sua fusse nulla, sì che tutta la differenza di velocità, che tra essi mobili si ritrovasse, referir si dovesse alla sola disuguaglianza di peso; e perché solo uno spazio del tutto voto d'aria e di ogni altro corpo, ancor che tenue e cedente, sarebbe atto a sensatamente mostrarci quello che ricerchiamo, già che manchiamo di cotale spazio, andremo osservando ciò che accaggia ne i mezzi più sottili e meno resistenti, in comparazione di quello che si vede accadere ne gli altri manco sottili e

---

<sup>69</sup> G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., p. 81.

<sup>70</sup> Interessanti riflessioni su questo aspetto vengono sviluppate da Husserl ne *La crisi delle scienze europee* nel paragrafo 9 dedicato a Galileo e alla sua matematizzazione della natura.

più resistenti: ch  se noi troveremo, in fatto, i mobili differenti di gravit  meno e meno differir di velocit  secondo che in mezzi pi  e pi  cedenti si troveranno e che finalmente, ancor che estremamente diseguali di peso, nel mezzo pi  d'ogni altro tenue, se ben non voto, piccolissima si scorga e quasi inosservabile la diversit  della velocit , parmi che ben potremo con molto probabil coniettura credere che nel vacuo sarebbero le velocit  loro del tutto eguali<sup>71</sup>.

Il metodo impiegato da Galileo, osserva Koertge,   oggi una pratica abitualmente diffusa tra gli scienziati: si varia il grado della perturbazione, si valutano gli effetti che derivano da tale operazione e infine si estrapola al caso limite in cui la perturbazione   assente<sup>72</sup>. L'empirismo sofisticato dell'ultimo Galileo si realizza, dunque, nel rapporto dinamico tra pensiero ed esperienza sotteso al processo idealizzante che si pone come prosecuzione sul piano concettuale di prassi empiriche suggerite da osservazioni e/o da tecniche sperimentali.

#### *4. Ostacoli di natura fisica e idealizzazione*

Nel paragrafo precedente abbiamo avuto modo di constatare come gli «impedimenti della materia», assolvano in un certo senso una funzione costitutiva nel processo di costruzione dell'immagine scientifica della realt  in quanto ostacoli forieri di straordinarie scoperte e nuova conoscenza: proprio al tentativo di superare le insidie ad essi connesse possiamo infatti ricondurre – almeno in linea di principio – la genesi epistemica delle prassi teoriche alla base dell'attivit  di modellizzazione caratteristica dell'odierna fisica.

Come nota Koertge, per Galileo ben pi  che per Aristotele gli «accidenti» rappresentano un complesso problema a cui occorre trovare un'adeguata

---

<sup>71</sup> Ivi, pp. 81-82.

<sup>72</sup> N. Koertge, «Galileo and the Problem of Accidents», cit., p. 408. Su questo punto si veda inoltre L. Geymonat, *Galileo Galilei*, Einaudi, Torino, 1969, pp. 302-304.

soluzione: se il filosofo greco, classificandoli come mere contingenze, suggerisce di ignorarli, Galileo, che pure li ritiene tali, intravede, avendoci “concretamente” a che fare, le potenziali difficoltà a cui andrebbe incontro l’osservatore ingenuo che vi si imbatte. Perturbando il fenomeno fisico, essi ostacolano di riflesso la sua comprensione complicando la ricerca e la formulazione delle leggi che lo regolano: questa è la lezione che lo scienziato impara a sue spese durante l’iniziale confronto con il fenomeno della caduta. Secondo quanto osserva Enrico Giusti nell’introduzione ai *Discorsi*<sup>73</sup>, la prima ipotesi avanzata in merito dal pisano contiene, infatti, un grossolano errore dovuto proprio alla difficoltà di soppesare le differenti grandezze coinvolte nel fenomeno: sbagliando a valutare l’incidenza del mezzo resistente sul moto di caduta, Galileo giudica accidentale non lo stato di moto uniforme successivo al raggiungimento della velocità limite da parte del corpo, bensì la transitoria fase di accelerazione iniziale. Di questa chiosa storica, al di là del suo intrinseco interesse, si può fare un monito didattico: «difalcare gli impedimenti della materia» è compito tutt’altro che semplice e richiede una profonda abilità nell’individuare le grandezze fondamentali distinguendole da quelle perturbative e da quelle influenti. A conferma si rammentino i commenti di Guerraggio a proposito del ruolo fondamentale che ricopre l’*expertise* del ricercatore nella complicata fase di costruzione del modello. Proprio la necessità di ovviare agli “accidenti fisici” si pone così all’origine dell’idealizzazione, prassi di natura teorica costitutiva del processo di modellizzazione, che tuttavia rivendica una peculiare origine empirica: la bontà e l’efficacia dell’argomentazione con cui Galileo – per bocca di Salviati – confuta le obiezioni di Simplicio riposa, infatti, su un operare attivo nell’esperienza che, a partire da regolarità

---

<sup>73</sup> E. Giusti, «Galilei e le sue leggi del moto», in G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., pp. IX-LXIII.

disponibili sul piano percettivo<sup>74</sup>, prepara il passaggio al caso ideale quale limite verso cui converge la serie ordinata in cui possono essere disposti i singoli casi reali che ad esso asintoticamente tendono. L'idealizzazione è quindi frutto dell'operare del soggetto – in qualità di agente cognitivo e intenzionale – in conformità con i vincoli che l'esperienza impone e in vista di un suo superamento nella direzione del caso limite, il quale, in questo modo, può fungere da metro con cui vagliare e misurare i casi reali.

L'insistere su questo aspetto è funzionale non solo all'esigenza di aderenza epistemologica al sapere esperto, ma anche al rispetto delle condizioni pedagogiche del suo apprendimento: nel suo porsi come integrazione concettuale di una successione ordinata di dati empiricamente rilevabili, l'idealizzazione, infatti, sorgendo sullo sfondo di una prassi concreta e trasformandosi successivamente in un'operazione intellettuale, indica una possibile via per educare al pensiero astratto partendo da una base esperienziale che costituisce un necessario punto di ancoraggio per qualsiasi tipo di apprendimento.

Un contributo in questo senso proviene anche dall'articolo di Ernan McMullin, dove l'autore esplora la polisemia del concetto di "idealizzazione" a partire dalla distinzione<sup>75</sup> tra idealizzazione di costrutto (*construct idealization*), che pertiene al piano teorico-matematico della costruzione del modello, e idealizzazione causale (*causal idealization*), riconducibile invece al piano empirico-sperimentale della sua validazione. Poiché all'idealizzazione di costrutto, intesa come semplificazione della rappresentazione concettuale di sistemi fisici reali, abbiamo riservato ampio spazio nel secondo capitolo, ci concentreremo esclusivamente sull'idealizzazione causale che, ponendosi come una forma di

---

<sup>74</sup> Ad esempio il fatto che variando la densità del mezzo in senso decrescente due corpi di peso diverso cadono con velocità sempre più simili, diminuisce la differenza di velocità di caduta tra corpi di peso differente, lasciando ragionevolmente presumere che, una volta eliminato il mezzo, tali velocità si eguagliano.

<sup>75</sup> E. McMullin, «Galilean idealization», cit., p. 255.

semplificazione operata direttamente sul fenomeno, ne rappresenta il correlato e, in un certo senso, la “naturale anticipazione” sul versante empirico.

Nello specifico, tale forma di idealizzazione consiste nella scomposizione analitica dei fattori causali simultaneamente all’opera nei normali contesti quotidiani, vale a dire nella riduzione della complessità della natura all’ordine imposto artificialmente dall’esperimento: dalla situazione-problema iniziale (esperienza) si passa in questo modo a una situazione controllata (esperimento) in cui viene manipolata una sola variabile (indipendente) per scoprire l’effetto prodotto su un’altra variabile (dipendente), mantenendo costanti tutte le altre condizioni (che rappresentano quindi le clausole *ceteris paribus* dell’eventuale legge). L’esperimento, sapientemente progettato per rispondere a una domanda su un particolare fenomeno, richiede, infatti, il controllo dei fattori causali esterni che lo influenzano perturbandolo, fattori che possono essere rimossi oppure ridotti così che i loro effetti risultino trascurabili o ancora, in caso le precedenti opzioni non siano percorribili, “calcolati” per poi inferire indirettamente il caso ideale (caso limite).

In questo senso, anche l’approccio asintotico al “caso limite” può essere fatto rientrare tra le idealizzazioni di tipo sperimentale: isolando e facendo variare una singola causa (in questo caso la densità del mezzo resistente) grazie alla combinazione di tecniche sperimentali e concettuali si può giungere alla conclusione – controfattuale – che tutti i corpi, indipendentemente dal peso, cadrebbero nel vuoto alla stessa velocità, giustificandola sulla base dell’uniformità di comportamento verso cui convergono quegli stessi corpi al tendere a zero<sup>76</sup> della densità del mezzo

---

<sup>76</sup> Il mezzo a densità zero è appunto il vuoto che rappresenta il caso limite solo concettualmente pensabile, almeno ai tempi di Galileo quando non era possibile produrlo sperimentalmente.

resistente in cui sono posti<sup>77</sup>. Questa operazione di semplificazione eseguita in concreto può, se adeguatamente trasposta, suggerire una simile procedura in astratto: poiché, come sottolineano anche Rosenblueth e Wiener, «ogni buon esperimento non è altro che una buona astrazione»<sup>78</sup>, un uso sorvegliato ed epistemologicamente avvertito della tecnica sperimentale – oltre che a chiarire tale fondamentale dimensione dell’agire scientifico – può rivelarsi un modo didatticamente efficace per introdurre strumenti epistemici sofisticati quali il ragionamento basato sui controfattuali, a sua volta riconducibile, all’interno della classificazione avanzata da McMullin, a una peculiare forma di idealizzazione “al congiuntivo” (*subjunctive idealization*).

Nello specifico, il filosofo definisce *subjunctive idealization* la semplificazione causale compiuta a livello concettuale anziché sperimentale che – focalizzando l’attenzione su un singolo fattore ed escludendo

---

<sup>77</sup> E. McMullin, «Galilean idealization», cit., p. 267-268. Concordiamo con McMullin, tuttavia, che la tecnica galileiana di scomposizione analitica dei fattori causali contemporaneamente in gioco nella comune esperienza non pare funzionare così bene quando l’oggetto di studio è rappresentato da un organismo complesso o un gruppo sociale. In questi casi, infatti, gli «impedimenti» non possono essere facilmente individuati e rimossi come accade, ad esempio, nel caso della discesa di una sfera lungo un piano inclinato. Sebbene il nostro contributo riguardi esclusivamente la fisica classica, riteniamo opportuno richiamare l’attenzione su questo “limite metodologico” per non incorrere nel falso mito dell’applicazione di un unico metodo indipendente dal dominio conoscitivo che si sta indagando. Esclusa la possibilità di individuare un unico insieme di condizioni necessarie e sufficienti per definire le diverse discipline che ricadono sotto il titolo di scienze empiriche, occorre, quindi, prendere atto della peculiarità dei problemi epistemici che esse pongono nonché della necessità di disporre di un’ampia varietà di strumenti e tecniche per una loro efficace gestione. Per un approfondimento su questo aspetto, oltre a quanto esposto nel terzo paragrafo del terzo capitolo, si rinvia al testo di Cristina Amoretti e Nicla Vassallo (Id., *Piccolo trattato di epistemologia*, Codice edizioni, Torino, 2010, in particolare pp. 20-23) dove le autrici discutono l’ipotesi di abbandonare il tentativo anacronistico di identificare la “natura essenziale” della scienza alla luce della teoria wittgensteiniana dei giochi linguistici basata sull’idea di “somiglianze di famiglia”.

<sup>78</sup> Così si esprimono gli autori: «Nessuna parte costitutiva dell’universo è talmente semplice da lasciarsi afferrare e controllare senza astrazione. Spesso il ricercatore non è consapevole del procedimento metodologico da lui usato, né, per altro, è indispensabile che lo sia. Si possono dare contributi scientifici importanti, soprattutto in campo sperimentale, anche senza che lo sperimentatore si renda conto che ogni buon esperimento non è altro che una buona astrazione». A. Rosenblueth, N. Wiener, «Il ruolo dei modelli nella scienza», in V. Somenzi, R. Cordeschi (a cura di), *La filosofia degli automi: origini dell’intelligenza artificiale*, Bollati Boringhieri, Torino, 1994, pp. 86-92, in particolare p. 86.

temporaneamente gli altri – postula una risposta alla domanda “che cosa accadrebbe se...”<sup>79</sup>. Sull’importanza delle asserzioni ipotetiche o controfattuali è appena il caso di insistere data la loro pervasività nella scienza nonché il loro legame con le clausole *ceteris paribus* che sfugge alla comprensione di molti studenti i quali, spesso, interpretano le “verità” scientifiche come asserzioni categoriche sul mondo. Non solo. L’importanza del ragionamento controfattuale si lega a doppio filo al suo impiego nella costruzione di esperimenti mentali, ovvero di esperimenti condotti esclusivamente nell’immaginazione applicando le leggi della fisica, nel tentativo di visualizzare con l’occhio della mente situazioni idealizzate dominabili in maniera puramente logica. Un esempio paradigmatico dell’impiego della tecnica del *Gedankenexperiment* – che, come sottolinea Fischbein, rappresenta un requisito essenziale della mente scientifica<sup>80</sup> – è fornito da Galileo nella Quarta Giornata dei *Discorsi* a proposito della scomposizione – puramente intelligibile ma non concretamente attuabile – nelle due distinte componenti, orizzontale e verticale, del moto parabolico del proiettile. Scrive Galileo:

[...]. Nella trattazione, che ora comincio, cercherò di presentare, e di stabilire sulla base di salde dimostrazioni, alcuni fenomeni notevoli e degni di essere conosciuti, che sono propri di un mobile, mentre si muove con moto composto di un duplice movimento, cioè di un movimento equabile e di uno naturalmente accelerato: tale appunto sembra essere quello che chiamiamo moto dei proietti; la generazione del quale così stabilisco. Immagino di avere un mobile lanciato su un piano orizzontale, rimosso ogni impedimento: già sappiamo, per quello che abbiamo detto più diffusamente altrove, che il suo moto si svolgerà equabile e perpetuo sul medesimo piano, qualora questo si estenda all'infinito; se invece intendiamo [questo piano] limitato e posto in alto, il mobile, che immagino dotato di gravità, giunto all'estremo del piano e continuando la sua corsa, aggiungerà al precedente movimento equabile e indelebile quella propensione all'ingiù dovuta alla propria

<sup>79</sup> E. McMullin, «Galilean idealization», cit., p. 268.

<sup>80</sup> E. Fishbein, cit., p. 48. Sebbene, come rammenta McMullin, le origini di questa peculiare tecnica siano ben più antiche, la fertilità di tale strumento metodologico in ambito scientifico emerge con chiarezza proprio a partire dall’uso che ne fa Galileo. Id., «Galilean idealization», cit., in particolare p. 269.



gravità: ne nasce un moto composto di un moto orizzontale equabile e di un moto *deorsum* naturalmente accelerato, il quale [moto composto] chiamo proiezione<sup>81</sup>.

In questo modo il moto del proiettile – generalizzando, il moto di un qualsiasi oggetto lanciato in orizzontale – è logicamente concepito come un moto bidimensionale risultante dalla combinazione di due moti idealizzati e tra loro completamente indipendenti che avvengono lungo direzioni distinte: un moto orizzontale rettilineo e uniforme, potenzialmente perpetuo (come vuole il principio d'inerzia), e un moto verticale uniformemente accelerato dovuto alla gravità del corpo in movimento<sup>82</sup>. L'analisi concettuale operata da Galileo può così essere considerata un'estensione al piano ideale del pensiero – che, in quanto campo del possibile, è svincolato dalle costrizioni della materia – della tecnica di semplificazione causale adottata nella conduzione di esperimenti reali.

Ne consegue come l'epistemologia della nuova fisica matematizzata non risponda né ad un razionalismo dogmatico né ad un empirismo ingenuo<sup>83</sup>: le leggi fisiche, pur non essendo a rigore classificabili come generalizzazioni empiriche poiché non derivano induttivamente dall'esperienza, non sono nemmeno creazioni arbitrarie della mente umana che, in virtù di una qualche non ben precisata corrispondenza riescono poi a rappresentare, più o meno adeguatamente, il comportamento di corpi e fenomeni reali. In un

---

<sup>81</sup> G. Galilei, , *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., p. 249.

<sup>82</sup> È bene rammentare che Galileo, gettando le basi della cinematica, si focalizza sulla descrizione dei movimenti più che sulle cause che li determinano. Solo con Newton si perviene alla formulazione esplicita della nozione di forza di gravità quale causa non solo del movimento di caduta dei corpi terrestri, ma anche del moto dei corpi celesti.

<sup>83</sup> Considerazioni a sostegno di questa tesi si trovano in L. Geymonat, *Galileo Galilei*, Einaudi, Torino, 1969, pp. 281-309; P. Rossi, «Ci sono molti Galilei?», in *Un altro presente. Saggi sulla storia della filosofia*, cit.; F. Minazzi, *Galileo "filosofo geometra"*, cit. In questo saggio, l'autore sostiene come la fisica galileiana nasca, infatti, sotto il segno dell'alleanza tra il «filosofo geometra» e «l'artista», ovvero colui che «si sporca le mani manipolando direttamente il mondo, lottando con la materia ed escogitando particolari ritrovati tecnici». Ivi, pp. 314-315.

certo senso, come già notava Husserl a proposito della geometria<sup>84</sup>, il problema dell'origine si lega a doppio filo a quello dell'applicabilità, sebbene nei due casi l'esperienza ricopra ruoli differenti: nel primo suggerisce possibili costruzioni idealizzate, nel secondo, entro i limiti di approssimazione stabiliti dal "ragionevole accordo" o dagli scopi di chi ne fa uso, ne conferma la bontà. Di qui una breve digressione sulle possibili accezioni con cui può essere inteso il termine esperimento che ben si attaglia all'angolazione epistemologico-didattica del nostro discorso.

Robert Crease ne *Il prisma e il pendolo*, passando in rassegna alcuni esperimenti da lui definiti tra i più belli nella storia della scienza, include un interludio che apre una riflessione sulle differenti funzioni cui può assolvere un esperimento. Distinguendo tra *performance* e dimostrazione, l'autore sostiene come l'esperimento in senso autentico sia «una sorta di *performance* che svela qualcosa per la prima volta»<sup>85</sup>, mentre definisce dimostrazione un «esperimento ricapitolato» al servizio di un qualche fine, che spesso tende ad adombrare le difficoltà connesse alla progettazione e all'esecuzione dell'esperimento originario da cui deriva<sup>86</sup>. Nell'esperimento, dunque, gli autori che pongono la domanda, non conoscendo in anticipo l'esito della *performance*, coincidono con gli spettatori in attesa della risposta, o comunque ne rappresentano un sottoinsieme. Al contrario, la dimostrazione rappresenta «un'azione standardizzata» dove chi organizza e chi assiste sono persone diverse come – ad esempio – nel caso dell'esperimento della Torre di Pisa di Galileo: lasciando cadere delle palle di diverso peso dalla cima della Torre pendente (ammesso sia vero), Galileo certamente non intendeva soddisfare un suo dubbio conoscitivo – sostiene

---

<sup>84</sup> E. Husserl, *La crisi delle scienze europee*, cit., paragrafo 9.

<sup>85</sup> R. Crease, *Il prisma e il pendolo*. Longanesi, Milano, 2007, p. 52.

<sup>86</sup> Ivi, pp. 52-55.

Crease – bensì convincere i suoi avversari della legge sulla caduta dei gravi<sup>87</sup>.

La dimostrazione si pone, quindi, come una peculiare modalità di trasposizione didattica dell'esperimento originario (*savoir savant*) che, per essere pedagogicamente ed epistemologicamente fondata, deve aderire alla forma scientifica del sapere, salvaguardandone al contempo la valenza formativa. Questo impone ai docenti di prestare particolare attenzione nell'uso – spesso poco sorvegliato – delle dimostrazioni per veicolare e trasmettere contenuti scientifici: per quanto a volte necessari, tali espedienti didattici – proprio perché più idonei a suscitare persuasione che a promuovere una reale comprensione – non devono sostituirsi alla «sperimentazione» di «natura esplorativa» quale autentico *modus operandi* di Galileo. Come, infatti, ammonisce Crease:

Le dimostrazioni, le relazioni contenute nei libri di testo e le simulazioni possono anche dare idee sbagliate della scienza, incoraggiando la sensazione che un esperimento scientifico, anziché essere un processo, sia solo un'illustrazione di una lezione già formulata: trasformando l'esperimento in un capolavoro di dipinto applicando a un modello colori indicati da numeri. Anche se un esperimento scientifico può indicare un semplice fatto, scrisse lo storico della scienza Frederic Holmes, esso è stato estratto da una «matrice di complessità», e introduce inevitabilmente nuove dimensioni di complessità<sup>88</sup>.

Vi è, tuttavia, un'ulteriore accezione con cui può essere impiegato il termine esperimento, un'accezione per così dire “primordiale” che possiamo considerare un'anticipazione pre-teorica del gioco linguistico a cui ci ha introdotti la scienza. Su questa diversa accezione si sofferma Giovanni Piana commentando l'attività dello sperimentare così come viene presentata all'interno del testo di Paolo Bozzi sulla *Fisica Ingenua*. Qui l'esperimento

---

<sup>87</sup> *Ibidem*.

<sup>88</sup> F. Holmes, *Meselson, Stahl, and the Replication of DNA: A History of «The Most Beautiful Experiment in Biology»*, Yale University Press, New Haven 2001, pp. IX-X, citato in R. Crease, *Il prisma e il pendolo*, cit., p. 55.

compare *in primis* – nota Piana – come «un vero e proprio modo di stabilire un contatto con la realtà, un modo di saggiarla, di metterla alla prova»<sup>89</sup>, anche semplicemente attraverso un osservare attento e curioso a cui, tuttavia, occorre essere educati; «a furia di “sapere” cose sul mondo», sostiene infatti Bozzi, «abbiamo disimparato a guardare, ad esercitare l'osservazione con finezza e attenzione»<sup>90</sup>.

Piana rintraccia le possibili radici di questo modo di concepire lo sperimentare al di fuori della scienza, addirittura nel gioco infantile e, nello specifico, in quei «giochi in cui si mettono alla prova gli stessi nessi del reale in una sorta di libera variazione operata sul reale stesso, in cui si vuol vedere che cosa accade se invece di questo rapporto ci fosse quest'altro»<sup>91</sup>. Sperimentare, in questo senso, significa osservare attentamente il mondo e accorgersi di quegli aspetti che, «per il fatto di essere familiari sembrano non costituire problema»<sup>92</sup> e che invece possono serbare sorprese inattese come dimostrano le attestazioni di meraviglia da parte di Galileo per l'isocronismo delle oscillazioni del pendolo. Scrive Bozzi:

L'osservazione qualitativa, l'esame della natura fatto all'interno del mondo dei sensi, può svolgere ruoli che vanno al di là della bella descrizione; può diventare uno strumento epistemologico acuto e fecondo quando si tratta d'incidere il tessuto dell'apparenza per cercare sotto ad essa lo scheletro di una logica matematizzabile, o tra le sue pieghe il punto adatto all'applicazione di una misura, il luogo giusto per una operazione<sup>93</sup>.

Sostenere che l'esperimento è innanzitutto una *Gestalt* e non una mera raccolta di dati significa allora ricordare come prima e all'origine di

---

<sup>89</sup> G. Piana, «Intervento sul libro *Fisica ingenua* di Paolo Bozzi», cit.

<sup>90</sup> P. Bozzi, *Fisica Ingenua*, cit., p. 158.

<sup>91</sup> G. Piana, «Intervento sul libro *Fisica ingenua* di Paolo Bozzi», cit.

<sup>92</sup> P. Bozzi, «Fenomenologia del movimento e dinamica pregalileiana», cit., p. 382.

<sup>93</sup> Id., «Le ragioni di Simplicio ossia la base percettiva del moto pendolare e della discesa lungo i piani inclinati», in M. Baldo Ceolin (a cura di), *Galileo e la scienza sperimentale*, Padova, Dipartimento di Fisica “Galileo Galilei”, 1995, pp. 105-132, p. 111.

qualsivoglia misurazione vi sia «l'ingenua freschezza dell'osservazione qualitativa»<sup>94</sup> tesa alla problematizzazione dell'ovvio, di ciò che si è sempre avuto sotto gli occhi ma che non si è mai propriamente visto. Come queste considerazioni di natura epistemologica guadagnino pertinenza rispetto a un agire didattico finalizzato alla promozione di una “mente autenticamente disciplinare” appare, a nostro avviso, quantomeno plausibile sulla base dei problemi sollevati e discussi nel capitolo precedente.

### 5. *Ostacoli di natura matematica e approssimazione*

Se il confronto con gli “accidenti fisici” favorisce la genesi di varie forme di idealizzazione, agli accidenti di tipo matematico si connette invece un'altra importante prassi epistemica, fondamentale nell'approccio allo studio della realtà naturale attraverso modelli: l'approssimazione. Come si può facilmente evincere da una ricognizione storica sull'argomento, l'abitudine ad effettuare approssimazioni non nasce con Galileo: già Archimede<sup>95</sup>, suo insigne predecessore, ne aveva fatto un tratto distintivo del suo modo di operare. Proprio al matematico siracusano lo scienziato si richiama, infatti, per giustificare la discrepanza tra la descrizione matematica di alcune proprietà degli oggetti materiali e le loro effettive proprietà reali, come attesta il seguente passo tratto dal *De Motu*, qui riportato nella traduzione inglese curata da Drabkin:

Now I am not unaware that someone at this point may object that for the purpose of these proofs I am assuming as true the proposition that weights suspended from a balance make right angles with the balance - a proposition that is false, since the

---

<sup>94</sup> Ivi, p. 106.

<sup>95</sup> Per un approfondimento sul *modus operandi* di Archimede si veda, ad esempio, L. Russo, *La Rivoluzione dimenticata*, Feltrinelli, Milano, 2006. Sull'influsso di Archimede sull'opera di Galileo si rinvia a A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 228 e seg. Un punto di vista alternativo a quello espresso da Koyré e più vicino al nostro sentire in quanto capace di restituire tutta la complessità di tale rapporto è formulato da Minazzi in Id., *Galileo “filosofo geometra”*, cit., p. 231 e seg.

weights, directed as they are to the center of the universe, are convergent. To such objectors I would answer that I cover myself with the protecting wings of the superhuman Archimedes, whose name I never mention without a feeling of awe. For he made this same assumption in his Quadrature of the Parabola. And he did so perhaps to show that he was so far ahead of the others that he could draw true conclusions even from false assumptions<sup>96</sup>.

Nel tentativo di costruire un solido «ponte tra il mondo di carta delle “certe dimostrazioni” e il mondo sensibile dei fenomeni»<sup>97</sup> attraverso il confronto con il “problema degli accidenti”, Galileo avverte quindi la necessità di abbandonare la chimera dell’accordo perfetto tra teoria ed esperienza in favore di una loro corrispondenza solamente approssimata. Dal punto di vista matematico, tale operazione semplificante – considerare, ad esempio, un corpo perfettamente sferico sebbene la sua superficie presenti qualche irregolarità o un piccolo arco di cerchio come fosse un segmento di retta – trova così piena giustificazione sulla base del fatto che, se “gli accidenti sono piccoli”, l’errore introdotto è influente ai fini dell’indagine fisica dei fenomeni naturali: la validazione empirica della rappresentazione matematica di oggetti e processi reali implica, infatti, la rilevazione di dati mediante strumenti di misura essi stessi soggetti a limiti di precisione. Paradigmatico, a questo proposito, il celebre esperimento di geodesia condotto da Gauss con lo scopo di testare la bontà della geometria euclidea nel descrivere lo spazio reale, di cui il matematico riferisce a conclusione del suo capolavoro *Disquisitiones generales circa superficies curvas* (1828). La conferma sperimentale del V postulato ottenuta confrontando il triangolo rettilineo giacente nel piano passante per le cime dei monti Hohenhagen, Brocken, Inselberg (rappresentanti i tre vertici) con il

---

<sup>96</sup> G. Galilei, *On motion and On mechanics: comprising De motu* (ca. 1590), transl., with introd. and notes, by I. E. Drabkin; and *Le meccaniche* (ca. 1600) transl. with introd. and notes by Stillman Drake, University of Wisconsin Press, Madison, 1960, p. 67, cit. in N. Koertge, «Galileo and the Problem of Accidents», cit., pp. 396-397.

<sup>97</sup> E. Bellone, *Galileo: le opere e i giorni di una mente inquieta*, Le Scienze, Milano, 1998, p. 24.

corrispondente triangolo curvilineo, tracciato al di sotto del primo sulla superficie terrestre, comprende, infatti, un esplicito riferimento ai limiti di precisione degli strumenti. In altri termini, a fini pratici è legittimo nonché assolutamente ragionevole considerare il triangolo terrestre come un triangolo piano poiché l'eccedenza rilevata nella somma degli angoli interni rispetto allo standard euclideo è troppo esigua per poter essere distinta da un eventuale errore sperimentale.

Delle difficoltà annesse alla comprensione di come il problema dell'approssimazione, intrecciandosi indissolubilmente con quello dell'applicabilità al mondo reale dei risultati conseguiti nel «mondo di carta», sia costitutivo della fisica come scienza empirico-matematica danno prova le obiezioni avanzate – sebbene con motivazioni affatto differenti – da Simplicio e da Guidobaldo Del Monte. Accomunati, nella loro diversità, dalla convinzione ingenua di una necessaria rispondenza speculare tra teoria e mondo fenomenico<sup>98</sup>, Simplicio giudica un ossimoro l'idea di una fisica matematica poiché «l'imperfezion della materia fa che le cose prese in concreto non rispondono alle considerate in astratto»<sup>99</sup>; Guidobaldo, al contrario, rivendica una rappresentazione matematicamente fedele degli «impedimenti della materia», impedimenti che non vanno in alcun modo rimossi – fisicamente o mentalmente – bensì, fin da subito, puntualmente calcolati. Entrambe le posizioni espresse dagli antagonisti intellettuali di Galileo testimoniano così la problematicità che si annida nelle regole di cui si compone il grande “gioco” della scienza matematizzata, regole che includono l'impiego di casi ideali privi di un immediato riscontro nella complessità fenomenica del reale.

---

<sup>98</sup> Si rammenti, a questo proposito, la confusione tra mappa e territorio di cui si è riferito nel terzo capitolo.

<sup>99</sup> G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano*, cit., pp. 179-181.

In particolare, le riserve di Guidobaldo<sup>100</sup> sul metodo di ascendenza archimedeo di dedurre conclusioni vere da premesse false «argomentando *ex suppositione*»<sup>101</sup>, denotano la confusione – diffusa ancora oggi – tra la “verità” delle equazioni rispetto al modello che caratterizzano e la più debole relazione di somiglianza (o verità approssimata) che invece il modello intrattiene con il sistema fisico rappresentato. Proprio a questa distinzione accenna Galileo nel rispondere alle critiche sollevate da Simplicio il quale, a proposito del moto parabolico dei proiettili, si rivela poco incline a credere che «le cose dimostrate con tali supposizioni incostanti possano poi nelle praticate esperienze verificarsi»<sup>102</sup>:

Tutte le promosse difficoltà e istanze son tanto ben fondate, che stimo essere impossibile il rimuoverle, ed io, per me, le ammetto tutte, come anco credo che il nostro Autore esso ancora le ammetterebbe; e concedo che le conclusioni così in astratto dimostrate si alterino in concreto, e si falsifichino a segno tale, che né il moto trasversale sia equabile, né l'accelerazione del naturale sia con la proporzione supposta, né la linea del proietto sia parabolica, etc.: ma ben, all'incontro, domando che elle non contendano al nostro Autor medesimo quello che altri grandissimi uomini hanno supposto, ancor che falso. E la sola autorità d'Archimede può quietare ogn'uno, il quale, nelle sue *Mecaniche* e nella prima *Quadratura della parabola*, piglia come principio vero, l'ago della bilancia o stadera essere una linea retta in ogni suo punto egualmente distante dal centro commune de i gravi, e le corde alle quali sono appesi i gravi esser tra di loro parallele: la qual licenza viene da alcuni scusata, perché nelle nostre pratiche gli strumenti nostri e le distanze le

---

<sup>100</sup> Guidobaldo, rivolgendo le sue critiche al lavoro di Archimede *Sull'equilibrio dei piani ovvero sui centri di gravità dei piani*, si esprime come segue: «though at times the truth may accidentally follow from false assumptions, nevertheless it is the nature of things that from the false the false generally follows, just as from true things the truth always follows. So it is no wonder that, when they assume false things as true and use these as a basis, they deduce and conclude things that are quite false. These men are, moreover, deceived when they undertake to investigate the balance in a purely mathematical way, its theory being actually mechanical; nor can they reason successfully without the true movement of the balance and without its weights, these being completely physical things, neglecting which they simply cannot arrive at the true cause of events that take place with regard to the balance». S. Drake, I. E. Drabkin, *Mechanics in sixteenth-century Italy: Selections from Tartaglia, Benedetti, Guidobaldo & Galileo*, Madison: University of Wisconsin Press, 1969, pp. 278-279, cit. in N. Koertge, cit., p. 397.

<sup>101</sup> G. Galileo, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., p. 255.

<sup>102</sup> Ivi, p. 256



quali vengono da noi adoperate, son così piccole in comparazione della nostra gran lontananza dal centro del globo terrestre, che ben possiamo prendere un minuto di un grado del cerchio massimo come se fusse una linea retta, e due perpendicoli che da i suoi estremi pendessero, come se fossero paralleli. Che quando nelle opere praticali si avesse a tener conto di simili minuzie, bisognerebbe cominciare a riprendere gli architetti, li quali col perpendicolo suppongono d'alzar le altissime torri tra linee equidistanti. Aggiungo qui, che noi possiamo dire che Archimede e gli altri supposero nelle loro contemplazioni, esser costituiti per infinita lontananza remoti dal centro, nel qual caso i loro assunti non erano falsi, e che però concludevano con assoluta dimostrazione. Quando poi noi vogliamo praticar in distanza terminata le conclusioni dimostrate col suppor lontananza immensa, doviamo diffalcar dal vero dimostrato quello che importa il non esser la nostra lontananza dal centro realmente infinita, ma ben tale che domandar si può immensa in comparazione della piccolezza de gli artificii praticati da noi: il maggior de i quali sarà il tiro de i proietti, e di questi quello solamente dell'artiglierie, il quale, per grande che sia, non passerà 4 miglia di quelle delle quali noi siamo lontani dal centro quasi altrettante migliara; ed andando questi a terminar nella superficie del globo terrestre, ben potranno solo insensibilmente alterar quella figura parabolica, la quale si concede che sommamente si trasformerebbe nell'andare a terminar nel centro<sup>103</sup>.

Alla mancata comprensione della funzione rappresentazionale dei modelli si accompagna inevitabilmente un radicale fraintendimento della logica del cammino scientifico, della quale né Simplicio – rifiutando un approccio di tipo matematico allo studio dei fenomeni naturali – né Guidobaldo – con il suo volerne cogliere nell'immediato tutta la complessità – riescono ad afferrare le profonde implicazioni. Dalle parole proferite da Galileo-Salviati nel dialogo con il suo interlocutore aristotelico, si evince *in nuce* come, peculiare della *forma mentis* del fisico, sia infatti proprio la capacità d'isolare, in un fenomeno reale, le variabili fondamentali dalle variabili perturbatrici e da quelle ininfluenti, e – più in generale – di operare delle semplificazioni al fine di costruire un modello depurato da tutti quei fattori che renderebbero assai complicata la sua trattazione in termini matematici. Ciò comporta, tuttavia, che parallelamente al ragionamento *ex supposizione*

---

<sup>103</sup> Ivi, pp. 256-257. Un interessante commento a questo passo è offerto da McMullin in Id., «Galilean idealization», cit., pp. 256-257.

condotto «in astratto» si ricerchino «in concreto» le condizioni di validità delle idealizzazioni ed approssimazioni introdotte nel modello.

Sulla scia della lezione di Archimede, Galileo giustifica così le sue considerazioni matematiche sul moto parabolico dei proiettili circoscrivendone la validità ai casi in cui è possibile approssimare la superficie terrestre a un piano, ossia a quelli in cui la gittata dei proiettili è breve, esattamente come accade per quelli d'artiglieria che percorrono al massimo distanze pari a un millesimo del raggio della terra prima di toccare il suolo. Sotto questo vincolo, infatti, la traiettoria parabolica matematicamente calcolata e quella del proiettile reale non differiscono in maniera apprezzabile. Un analogo discorso riserva alla resistenza del mezzo: data la sua bassissima densità, l'aria è assimilabile al vuoto se la velocità dei corpi si mantiene sufficientemente bassa e parimenti l'effetto dell'attrito, condizione che si verifica – sostiene Galileo – nel caso di «proiettili praticabili da noi [...] come frecce, lanciati con frombe o archi», per i quali «insensibile sarà del tutto lo svario del lor moto dall'esatta figura parabolica»<sup>104</sup>.

Casi che si discostino sensibilmente da quelli citati richiedono invece che il modello ideale ad essi associato venga opportunamente modificato così da rendere conto dello scarto tra le «sensate esperienze» e le «certe dimostrazioni». Una volta compresa la dinamica fondamentale del fenomeno indagato nella sua versione semplificata, è quindi possibile eliminare gradualmente le approssimazioni matematiche nonché introdurre la resistenza del mezzo come perturbazione sul processo base. Questo genere di procedura, che rappresenta l'autentico *modus operandi* della fisica moderna<sup>105</sup>, indica pertanto – in netto contrasto con le posizioni di Simplicio e di Guidobaldo, tuttora vive, sotto differenti forme, nelle menti di molti

---

<sup>104</sup> G. Galileo, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., p. 257.

<sup>105</sup> A. Frova, M. Marenzana, *Parola di Galileo*, Bur, Milano, 1998, in particolare pp. 65-76.

studenti – come il percorso in cui si articola la prassi del fisico evolva costitutivamente dal semplice verso il complesso. Su questo punto di fondamentale importanza avremo modo di soffermarci ulteriormente nell'ultimo paragrafo.

## 6. *Ostacoli percettivi e generalizzazione*

Gli ostacoli di natura percettiva richiamano i cosiddetti “accidenti osservazionali”, titolo generale sotto il quale Koertge riconduce due differenti tipi di «impedimenti»: da un lato le illusioni percettive unitamente ai giudizi fallaci da esse indotte, dall'altro gli errori sperimentali nella rilevazione e interpretazione dei dati, di cui il caso della “nuova stella” citato in precedenza fornisce un esempio. In questo paragrafo ci concentreremo esclusivamente sul primo ordine di questioni, affrontando il tema delle cosiddette “illusioni percettive” all'interno della più ampia problematica inerente alla distinzione tra leggi fisiche e leggi fenomenologiche<sup>106</sup> e di quella – ad essa strettamente connessa – del rapporto tra linguaggio scientifico e linguaggio ordinario. L'esigenza di una chiarificazione concettuale in tale direzione è suggerita, *in nuce*, dalla seguente considerazione di Koyré:

Siamo troppo informati o meglio troppo abituati ai principi e concetti della meccanica moderna, cosicché ci è quasi impossibile vedere le difficoltà che si dovette superare per fondarli. Ci sembrano così semplici, così naturali, che non notiamo i paradossi che implicano e contengono. Il fatto stesso che le più grandi e più potenti menti dell'umanità – Galileo, Cartesio – abbiano dovuto sforzarsi per

---

<sup>106</sup> Con leggi fenomenologiche qui non intendiamo le leggi empiriche della fisica, ma le leggi secondo cui la realtà fenomenica è organizzata. Trattare il tema delle illusioni percettive alla luce di questa distinzione guadagna legittimità se con Bozzi riconosciamo come a regolare le illusioni percettive siano le medesime leggi che governano tutta l'esperienza diretta del mondo esterno. Id., «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», cit., p. 281; Id., «fenomenologia del movimento e dinamica pregalileiana», cit., p. 381.

farle loro, è in sé sufficiente per mostrare che queste nozioni chiare e semplici – la nozione di moto e di spazio – non sono così chiare e semplici come sembrano; o meno chiare e semplici solo da un certo punto di vista, solo come facenti parte di un certo insieme di concetti e assiomi senza i quali non sono affatto semplici. O, forse, sono troppo chiare e semplici, e come tutte le nozioni base sono difficilissime ad afferrarsi<sup>107</sup>.

La parziale analogia<sup>108</sup> tra la condizione degli studenti alle prime armi con l'apprendimento della fisica e quella in cui versavano i contemporanei dello scienziato rende il monito di Koyré meritevole di considerazione da parte dei docenti i quali, assecondando il suo suggerimento, dovrebbero disporsi nell'atteggiamento dell'*epoché*<sup>109</sup> e problematizzare l'episteme, ripensando daccapo il percorso che conduce all'accettazione dell'ipotesi di una fisica che fa ampio ricorso a situazioni altamente idealizzate. In questo modo, infatti, ci si potrebbe facilmente accorgere di quanto il «concetto moderno di moto» – cardine della nuova *Weltanschauung* – possa effettivamente apparire «strano» a chi ha imparato a giocare il gioco linguistico del movimento e delle sue leggi a partire dagli esempi paradigmatici che di tale nozione sono disponibili sul terreno intuitivo. Come scrive Bozzi, infatti, «il particolare tipo di plausibilità chiamato in causa dai lettori di Aristotele» – così come da chi non ha ancora imparato a proiettare sul mondo le categorie della fisica moderna – è proprio «il fatto che, nonostante tutti i ragionamenti, *si vede così – e – così* e che dunque la ricerca di generalizzazioni capaci di unificare in una sola teoria fatti evidentemente

---

<sup>107</sup> A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 229.

<sup>108</sup> Parliamo solo di una parziale analogia poiché la concordanza tra le concezioni degli studenti e quelle dei contemporanei di Galileo non concerne le argomentazioni teoriche formulate dai peripatetici – che agli studenti sono sconosciute quanto quelle newtoniane – ma esclusivamente le basi percettive ed esperienziali di tali teorizzazioni le quali, invece, risultano comprensibilmente identiche.

<sup>109</sup> Il gesto metodologico dell'*epoché* viene qui inteso come la temporanea messa tra parentesi dei risultati e dei collaudati metodi della scienza al fine di chiarirne i presupposti di senso, così da far emergere la complessità e la controintuitività delle prassi epistemiche su cui si fondano i suoi successi.

diversi vuol dire sempre più perdere di vista la realtà dell'esperienza»<sup>110</sup>. Di qui le difficoltà di riformulare entro lo schema concettuale della scienza moderna un concetto che possiede una sua ben precisa “grammatica”, radicata nella trama dell'esperienza<sup>111</sup>.

Sullo sfondo di questa premessa, possiamo iniziare a marcare la distanza concettuale che separa la nozione intuitiva di moto dalla sua controparte sul piano scientifico, appellandoci innanzitutto alla distinzione fenomenologica tra oggetti animati e inanimati, distinzione che appartiene alla cornice di certezze su cui si innestano le comuni prassi quotidiane a cui si ancorano le nostre abitudini linguistiche. Gli esempi concreti su quali crescono le regole cui è subordinata la sensatezza delle espressioni verbali del linguaggio ordinario consentono, infatti, di attribuire un moto spontaneo solamente ai primi, costringendoci a riferire a fattori causali esterni l'eventuale moto dei secondi. In altre parole, l'esperienza insegna che la condizione naturale dei corpi inanimati è lo stato di quiete, il quale, pertanto, non abbisogna di spiegazioni di alcun genere; il moto, invece, come un qualsiasi altro processo, richiede necessariamente l'azione continua di una qualche forza – nell'immaginario comune generalmente associata allo sforzo muscolare di trazione o di spinta – che lo inneschi e lo mantenga, pena il suo graduale estinguersi.

---

<sup>110</sup> P. Bozzi, «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», cit., p. 283.

<sup>111</sup> Per quanto concerne l'origine del sistema di regole che dovrebbe fissare la grammatica dei termini del nostro linguaggio aderiamo alla tesi avanzata da Paolo Spinicci in Id., *Analitico e sintetico*, CUEM, Milano, 2007, in particolare p. 212 e seg. Senza sconfinare nella tesi ingenua di una specularità tra esperienza e linguaggio, il filosofo sottolinea come le regole secondo cui si struttura l'esperienza del mondo pongano, di fatto, dei vincoli al linguaggio che ne parla, vincoli che consentono un'aderenza degli usi linguistici all'effettiva realtà dei fatti. Si rammenti, inoltre, quanto esposto nel secondo paragrafo del terzo capitolo a partire dalla riflessione di Giovanni Piana.

Interessanti considerazioni a proposito del rapporto tra percezione e linguaggio si trovano anche in A. Zuczkowski, «Intervista di Andrzej Zuczkowski a Paolo Bozzi sul problema dei rapporti tra percezione e linguaggio», in *Semantica Percettiva. Rapporti tra percezione visiva e linguaggio*, Istituti Editoriali Poligrafici Internazionali, Pisa-Roma, 1999, pp. 153–177.

A partire da questa base esperienziale si sviluppa la pervicace e comprensibile convinzione – condivisa dai filosofi della natura pregalileiani e tuttora diffusa tra studenti di ogni ordine e grado scolastico – dell'intrinseca assurdità di un moto in assenza di forza nonché del legame di proporzionalità diretta tra la velocità di un oggetto in movimento e l'*impetus impressus*<sup>112</sup>, sua causa immanente al cui esaurirsi viene meno anche l'effetto<sup>113</sup>. Quest'ipotesi dalla forte plausibilità intuitiva s'inserisce in una più ampia categorizzazione, operata su base percettiva, che risponde alla duplice distinzione aristotelica tra moti naturali e moti violenti<sup>114</sup> e tra moti terrestri e moti celesti. Affidandoci alla pura osservazione ricaviamo, infatti, tre diverse classi di movimenti – il moto di oggetti spinti o trainati, il moto degli oggetti in caduta libera e i moti incessanti dei corpi celesti – a cui, intuitivamente, vengono fatte corrispondere altrettante spiegazioni differenti.

---

<sup>112</sup> A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 227.

<sup>113</sup> Questo è quanto sostiene la dinamica dell'*impetus* che risulta, di fatto, molto più vicina al senso comune di quella formulata da Aristotele, in particolare per quanto concerne la giustificazione del perdurare del moto violento di un proiettile una volta perso il contatto con il motore causa del movimento. Non sorprende, dunque, che le concezioni ingenuie degli studenti ripropongano non le artificiose speculazioni aristoteliche lontane dalla quotidiana esperienza, bensì le spiegazioni più intuitive fornite dai teorici dell'*impetus*. A questo proposito si rinvia a quanto esposto nel primo capitolo.

<sup>114</sup> Nella dinamica aristotelica i moti classificati come naturali – spiegati a partire dalla dottrina dei luoghi naturali – sono quelli apparentemente indipendenti dall'applicazione di una forza esterna concepita come una trazione o una spinta. Violenti sono invece i moti prodotti da una causa esterna. Tra i primi viene inclusa la caduta libera, tra i secondi il lancio di un proiettile. A proposito del fondamento percettivo e in particolar modo visivo di tale classificazione scrive Bozzi: «Nel regno della fisica questa distinzione non ha alcuna base plausibile, come è ovvio e come Galileo ha ampiamente e ripetutamente dimostrato ai suoi contemporanei. Nel mondo delle nostre esperienze dirette, viceversa, i movimenti sono in molti casi “naturalisti” come possono essere violenti o altrimenti espressivi. La distinzione che noi possiamo tracciare sul piano fenomenologico sicuramente non collima punto per punto con la teoria aristotelica dei moti locali. In quest'ultimo caso la distinzione sorge anche da necessità di coerenza sistematica, giustificabili tenendo presente l'economia complessiva della *Weltanschauung* aristotelica, e in particolare i fondamenti filosofici della meccanica terrestre e celeste. Ma la tenacia di questo errore attraverso duemila anni di storia della scienza diventa più comprensibile se si suppone che il dividere così i movimenti sia molto spontaneo, appunto perché rispecchia il nostro modo di vedere il moto nella realtà esterna». Id., «Fenomenologia del movimento», cit., pp. 391-392. Si rammenti inoltre quanto esposto nel secondo paragrafo del primo capitolo del presente lavoro.

Così era prima di Galileo e così è ancora oggi, per quanto il fatto che la legge di gravitazione sia entrata a far parte del senso comune di chiunque possieda qualche rudimento di fisica renda il problema invisibile a chi non lo indaga con strumenti teorici ed empirici adeguati. Per molti studenti, infatti, il riconoscere nella forza di gravità la causa comune della caduta dei gravi terrestri così come del moto dei corpi celesti ha la forma di un mero proto-apprendimento che raramente si accompagna alla comprensione dell'analogia epistemica sottostante a una simile affermazione; e ancor più di raro tale conoscenza dichiarativa prelude alla capacità di “vedere il simile” – nell’accezione kuhniana di cui abbiamo riferito nel secondo capitolo – che accomuna tutte e tre le differenti tipologie di moti, riconducendole a un’unica espressione  $F = ma$ , dove la differenza concerne esclusivamente la specifica funzione di forza in gioco.

A partire da Galileo, la fisica inaugura dunque una concezione di moto profondamente contraria al senso comune: la somiglianza epistemica istituita tra queste tre diverse classi di movimenti osservati in natura consente, infatti, di unificare, da un punto di vista formale, fenomeni percettivamente affatto diversi. Di qui la difficoltà per i novizi della disciplina di apprendere un nuovo gioco linguistico che utilizza lo stesso nome della sua anticipazione pre-teorica, cambiandone, tuttavia, significativamente il senso.

All’interno del nuovo paradigma ogni moto è relativo: un corpo può essere considerato in movimento solo in relazione a un altro corpo che si assume in quiete; di qui la possibilità di studiarlo solo rispetto ad un qualche sistema di riferimento. Non solo. Quietè e moto si equivalgono: anche quest’ultimo, infatti, è uno stato persistente che non necessita di essere spiegato attraverso l’introduzione di una qualche causa. Ciò che abbisogna di una spiegazione, al contrario, è ogni sua variazione, incluso il suo cessare. Col mutare della prospettiva mutano, quindi, anche le domande ritenute legittime e il modo di leggere i fatti dell’esperienza: non ci si deve più interrogare sul perché un

corpo si muove, ma sul perché si ferma o varia, in velocità, direzione o verso di percorrenza. Di qui il passo che conduce al principio di inerzia, frutto di un'idealizzazione dell'esperienza con i piani inclinati, è breve<sup>115</sup>: ogni corpo non soggetto a forze oppure soggetto a forze la cui sommatoria è nulla persegue nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

Nelle parole di Galileo:

*Salv.* Parmi dunque sin qui che voi mi abbiate esplicati gli accidenti d'un mobile sopra due diversi piani; e che nel piano inclinato il mobile grave spontaneamente scende e va continuamente accelerandosi, e che a ritenerlo in quiete bisogna usarvi forza; ma sul piano ascendente ci vuol forza a spignervelo ed anco a fermarlo, e che 'l moto impressogli va continuamente scemando, sí che finalmente si annichila. Dite ancora di piú che nell'un caso e nell'altro nasce diversità dall'esser la declività o acclività del piano, maggiore o minore; sí che alla maggiore inclinazione segue maggior velocità, e, per l'opposito, sopra 'l piano acclive il medesimo mobile cacciato dalla medesima forza in maggior distanza si muove quanto l'elevazione è minore. Ora ditemi quel che accaderebbe del medesimo mobile sopra una superficie che non fusse né acclive né declive.

*Simp.* Qui bisogna ch'io pensi un poco alla risposta. Non vi essendo declività, non vi può essere inclinazione naturale al moto, e non vi essendo acclività, non vi può esser resistenza all'esser mosso, talché verrebbe ad essere indifferente tra la propensione e la resistenza al moto: parmi dunque che e' dovrebbe restarvi naturalmente fermo. Ma io sono smemorato, perché non è molto che 'l signor Sagredo mi fece intender che così seguirebbe.

*Salv.* Così credo, quando altri ve lo posasse fermo; ma se gli fusse dato impeto verso qualche parte, che seguirebbe?

*Simp.* Seguirebbe il muoversi verso quella parte.

*Salv.* Ma di che sorte di movimento? di continuamente accelerato, come ne' piani declivi, o di successivamente ritardato, come negli acclivi?

*Simp.* Io non ci so scorgere causa di accelerazione né di ritardamento, non vi essendo né declività né acclività.

---

<sup>115</sup> Questo è vero almeno ad uno sguardo retrospettivo, poiché in realtà Galileo ha preparato la strada al principio d'inerzia senza tuttavia riuscire a formularlo correttamente. Il suo concetto d'inerzia risentiva ancora del peso della tradizione che riconosceva come unico moto permanente ed eterno quello circolare. L'inerzia a cui Galileo fa esplicito riferimento è infatti un'inerzia circolare, sebbene passi del *Dialogo* che commentano il moto lungo piani inclinati inducano a credere che il principio newtoniano ne sia un'inevitabile e immediata conseguenza. Su questo punto si veda M. R. Matthews, «Learning about Scientific Methodology and the "Big Picture" of Science: The Contribution of Pendulum Motion Studies», cit.; E. Giusti, «Galilei e le sue leggi del moto», cit.



*Salv.* Sì. Ma se non vi fusse causa di ritardamento, molto meno vi dovrebbe esser di quiete: quanto dunque vorreste voi che il mobile durasse a muoversi?

*Simp Simp.* Tanto quanto durasse la lunghezza di quella superficie né erta né china.

*Salv.* Adunque se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimente senza termine, cioè perpetuo?

*Simp.* Parmi di sí, quando il mobile fusse di materia da durare<sup>116</sup>.

Se dunque nella dinamica pregalileiana vicina al senso comune la forza produce movimento ovvero velocità, in quella galileiano-newtoniana la forza produce invece variazione di movimento e quindi accelerazione<sup>117</sup>. All'interno di questa prospettiva, il moto eterno – almeno in linea di principio – non è dunque quello circolare dei corpi celesti bensì quello rettilineo e uniforme<sup>118</sup>. E all'obiezione di coloro che osservano come non esista in natura niente di simile, la fisica moderna risponde che naturalmente tale tipo di moto «è del tutto impossibile e può avvenire solo nel vuoto»<sup>119</sup>. Se ci si sofferma a riflettere su queste premesse, rimettendo in discussione

---

<sup>116</sup> G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano*, cit., pp. 179-181. Posti due piani inclinati l'uno di fronte all'altro, un oggetto fatto scivolare lungo il primo risale per il secondo fino quasi a raggiungere l'altezza iniziale. Rimosso l'attrito, tale oggetto giungerebbe alla medesima altezza da cui è stato rilasciato senza tuttavia poterla superare in quanto la velocità necessaria per risalire lungo il secondo piano è la stessa guadagnata discendendo lungo il primo, velocità che dipende dunque dall'altezza e non dalla traiettoria. Osserva, infatti, Galileo che una corpo tende a raggiungere l'altezza di partenza indipendentemente dall'inclinazione del piano e pertanto dalla lunghezza del cammino da percorrere; pertanto, quando l'inclinazione è zero, l'altezza iniziale non potrà mai essere raggiunta e il moto lungo il piano risulta quindi perpetuo (ovviamente in condizioni ideali ovvero in assenza di attriti e ammessa l'infinità dello spazio) esattamente come accade per il moto pendolare. Un interessante punto di vista su questo esperimento che ne rappresenta anche una possibile efficace modalità traspositiva è fornito da Max Wertheimer in Id., *Il pensiero produttivo*, Giunti, Firenze, 1997, pp. 221-228.

<sup>117</sup> In questo caso tuttavia, cambiando il punto di vista e considerando la quiete come un particolare moto a velocità nulla, diventa facile passare dal primo assunto al secondo. La difficoltà sta tutta nel riuscire ad assumere un diverso punto di vista che per quanto possa essere giustificato e compreso anche a partire dall'esperienza non è direttamente ed immediatamente derivabile o suggerito da essa. Percettivamente moto e quiete sono assolutamente diversi, vedere nella seconda un caso limite del primo presuppone già un certo modo diverso – anche solo parzialmente – di guardare alle cose e ai fenomeni.

<sup>118</sup> Il moto circolare, a differenza di quello rettilineo uniforme, richiede necessariamente l'azione di una forza centripeta che faccia variare continuamente la direzione del vettore velocità producendo pertanto accelerazione. Nel caso del moto circolare uniforme, la velocità si mantiene uguale in modulo variando esclusivamente nella direzione, non così nel moto circolare vario oppure nel moto armonico.

<sup>119</sup> A. Koyré, «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, cit., p. 230.

una conclusione che oggi appare predeterminata, non c'è da sorprendersi del costo che in termini cognitivi (e non solo) ha rappresentato per i contemporanei di Galileo e tuttora rappresenta per gli studenti la comprensione di quello che Koyré definisce il

[...] sorprendente tentativo di spiegare l'essere reale con l'impossibile – o il che è lo stesso, di spiegare l'essere reale con l'essere matematico, perché questi corpi che si muovono in linea retta in uno spazio vuoto infinito non sono corpi *reali* che si muovono in uno spazio *reale*, ma corpi *matematici* che si muovono in uno spazio *matematico*<sup>120</sup>.

D'altronde, è solo a partire da tali rappresentazioni idealizzate che è poi possibile compiere generalizzazioni formali individuando analogie epistemiche tra fenomeni che rispondono ad esperienze visive assolutamente differenti<sup>121</sup>, esattamente come dimostra il caso dell'affinità – rilevata da Galileo – tra due tipi di cadute vincolate quali il moto lungo piani inclinati e quello pendolare. Quest'ultimo, infatti, può essere *visto* – wittgensteinamente – *come* un moto lungo una serie di piani inclinati tangenti alla traiettoria, solamente interpretando il pendolo reale come un pendolo ideale sottoposto ad attriti e alla resistenza dell'aria<sup>122</sup>. Il dato fenomenologico viene quindi letto attraverso le lenti della nuova fisica che si serve di casi idealizzati – guadagnati a mezzo del passaggio al limite a partire da regolarità colte sul piano dell'esperienza – per interpretare le situazioni reali empiricamente constatabili: prescindendo dalla resistenza

---

<sup>120</sup> Ivi, p. 231.

<sup>121</sup> Su questo punto insiste anche Nancy Nersessian, la quale conclude come solamente a partire da rappresentazioni idealizzate Galileo ha potuto rintracciare analogie tra fenomeni differenti così come schemi astratti comuni a differenti problemi. N. Nersessian, «Conceptual Change in Science and in Science Education», *Synthese*, 80 (1), Jul. 1989, pp.163-183, in particolare p. 175.

<sup>122</sup> Interessanti considerazioni in merito si possono trovare all'interno del sito The MAP prOject all'indirizzo [http://ppp.unipv.it/MAP/pagine/HISTO\\_01\\_it.HTM](http://ppp.unipv.it/MAP/pagine/HISTO_01_it.HTM). Il progetto MAP, voluto dalla Commissione Europea, rappresenta un programma d'aggiornamento per insegnanti di materie scientifiche basato su storia della scienza e Science Education a cui cooperano cinque Università europee.

dovuta all'attrito (caso ideale), il pendolo, oscillando, ritorna sempre alla medesima altezza di partenza indipendentemente dalle traiettorie percorse, esattamente come nell'esperimento dei piani inclinati contrapposti<sup>123</sup>.

La possibilità, a partire da un medesimo fatto percettivo, di orientare l'attenzione in un senso piuttosto che in un altro, non si traduce in una sua interpretazione totalmente arbitraria, bensì in una lettura che conserva una sua plausibilità sulla base di ciò che è percettivamente dato, pur conferendogli un senso che trascende il piano della pura esperienza. Come giustamente puntualizza Tom Settle, se Galileo avesse guardato un pendolo oscillare prima del cambio di paradigma «avrebbe “visto” un lento ma inesorabile accorciamento degli archi di oscillazione, tendente all'immobilità via via che il pendolo avesse perduto il suo iniziale *impetus*. Con le lenti della nuova fisica egli vide [invece] che, se si prescindeva dalla resistenza dovuta all'attrito, il peso ritornava esattamente alla stessa altezza»<sup>124</sup>.

In questa direzione vanno dunque interpretate le argomentazioni sostenute da Wittgenstein in merito al fenomeno – commistione di percezione e di pensiero – del “vedere come”: come osserva Paolo Spinicci, il dato percettivo non può essere oggetto di qualsiasi interpretazione, indipendentemente dai vincoli che la scena percettiva pone; è tuttavia possibile, dirigendo l'attenzione su certi aspetti invece che su altri, vederlo sotto una nuova luce<sup>125</sup>. Così il docente didatticamente avvertito – informato

---

<sup>123</sup> Si veda, in questo capitolo, la nota 117.

<sup>124</sup> T. Settle, «Per una lettura “sperimentale” delle ricerche di Galileo sul moto», in M. Baldo Ceolin (a cura di), *Galileo e la scienza sperimentale*, cit., pp. 9- 62, p. 31, nota 17.

<sup>125</sup> In questi termini si esprime Paolo Spinicci commentando la tesi wittgensteiniana secondo la quale il “vedere come” costituisce una commistione di percezione e pensiero: «Il vedere come non è soltanto un vedere, ma è anche un vedere secondo una regola o, come potremmo anche dire, secondo una qualche interpretazione». Id., *Lezioni sulle «Ricerche Filosofiche» di Ludwig Wittgenstein*, cit., p. 306. «Così, se posso vedere come tu mi chiedi è solo perché ha un senso pretendere che io tenti di considerare l'immagine alla luce di una regola nuova perché il cogliere una percezione alla luce di un gioco linguistico non è soltanto un accadimento ma è un agire, ed è quindi, come tale, in nostro potere» (Ivi, p. 312). Ne consegue che la possibilità, per gli studenti, di vedere il moto di un pendolo come

della distinzione epistemologica tra vedere e sapere<sup>126</sup>, tra leggi fisiche e leggi fenomeniche – è consapevole che uno studente, guardando oscillare un tappo di sughero appeso a un filo, non “vede” *eo ipso* un pendolo ideale rallentato dagli effetti di disturbo esercitati dalla resistenza dell’aria. E ciò è tanto più comprensibile se si rammentano le analisi fenomenologiche compiute da Bozzi che giustificano sperimentalmente le espressioni di meraviglia contenute nei testi galileiani, mostrando il fondamento percettivo della controintuitività di oscillazioni isocrone indipendentemente dalla loro ampiezza<sup>127</sup>. Egli sa anche, però, che introducendo opportunamente una serie di esempi e focalizzando l’attenzione dei discenti su come, al variare di determinate caratteristiche dei corpi oscillanti (massa, forma, dimensioni), gli effetti dell’aria diminuiscano, è possibile gradualmente condurli a visualizzare con “l’occhio della mente” il comportamento del pendolo ideale.

---

un moto lungo una serie di piani inclinati tangenti alla traiettoria si configura come una «prassi di ristrutturazione della scena percettiva» che dipende sia dai materiali percepiti, sia dalla capacità dell’insegnante di dirigere opportunamente lo sguardo dei discenti. Dalla possibilità di orientare l’attenzione su aspetti diversi di una stessa scena percettiva, nasce quindi la «possibilità di vedere le cose sotto una diversa luce»: in questo senso, «l’interpretare può far presa sul vedere solo rilevando in ciò che ci è percettivamente dato una diversa direzione dell’esemplarità» (Ivi, p. 322). In questo modo, inoltre, si sfugge sia a una visione dogmatica del sapere scientifico sia al completo relativismo a cui una centratura troppo forte sulla molteplicità di possibili punti di vista di fatto espone. Interessanti considerazioni sul tema del “vedere come” si trovano anche in P. Bozzi, *Vedere come. Commenti ai paragrafi 1-29 delle «Osservazioni sulla filosofia della psicologia» di Wittgenstein*, cit.

<sup>126</sup> Bozzi sottolinea come sia «facilissima la confusione – propria del senso comune – tra quanto è percepito e quanto è saputo di quello che si percepisce. [...] Supponiamo di avere davanti a noi due figure rettangolari ritagliate dallo stesso foglio di carta azzurra; una di esse ha i quattro lati diritti e l’altra li ha frastagliati, a zig zag come i bordi di un francobollo. Osservando le due figure si nota subito che il secondo di questi rettangoli è più chiaro dell’altro, e in ogni modo di un azzurro più vellutato e soffice [...]. L’osservatore può sapere benissimo che i due pezzi di carta sono identici, che le onde luminose riflesse dalla loro superficie appartengono al medesimo ordine di grandezza: quello che egli sa di quei colori non modifica minimamente quello che egli v e d e, e cioè due pezzi di carta cromaticamente un po’ diversi». Id., «Fenomenologia del movimento e dinamica pregalileiana», cit., pp. 380-381.

<sup>127</sup> Id., «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», cit.; Id., *Fisica ingenua*, cit., pp. 265-292. A questo proposito si rinvia a quanto esposto nel primo capitolo.

Sul piano didattico, pertanto, l'ascesa della gerarchia di modelli che collega la realtà alla teoria può ragionevolmente prendere le mosse dall'estrapolazione al caso limite, a partire dall'esibizione di una serie di casi reali che progressivamente si avvicinano al caso ideale: di qui, infatti, discende la possibilità di "vedere" i singoli pendoli reali come pendoli ideali soggetti a effetti di disturbo, ovvero di interpretare il dato percettivo secondo una regola che non nasce nel vuoto, ma che si àncora a un modo peculiare di leggere l'esperienza legittimato – benché non univocamente predeterminato – dall'esperienza stessa.

### *7. La validazione empirica del modello: gradi di somiglianza e bontà delle approssimazioni*

Nei paragrafi precedenti è emerso come l'evoluzione della fisica matematizzata sia scandita da una netta distinzione: da un lato il "mondo concettuale newtoniano" popolato da famiglie di modelli di differenti gradi di specificità, mondo in cui, ad esempio, la legge di caduta di Galileo può essere a pieno titolo considerata tale poiché l'equazione che la esprime descrive esattamente il moto di un punto materiale soggetto esclusivamente a una forza gravitazionale centrale; dall'altro il mondo reale, dove invece essa figura solamente come un'approssimazione – più o meno buona a seconda dei casi – dell'effettivo comportamento di un oggetto materiale lasciato cadere da una certa altezza. Tale premessa introduce al problema della specificazione delle condizioni sotto le quali un modello rappresenta una buona approssimazione del sistema fisico a cui si riferisce, ostacolo di cui ci occuperemo in questo paragrafo conclusivo.

Sulle difficoltà che si annidano attorno a questo compito è appena il caso di soffermarsi: sia lo studio di Oberle e colleghi, sia le risposte e i commenti dei partecipanti al laboratorio di Fisica ne danno chiara testimonianza. Al fine di evitare generalizzazioni che tolgono efficacia al discorso, ci

concentreremo su un caso specifico – nella fattispecie il moto dei gravi in un mezzo resistente – per cercare di mettere in luce entro che limiti il modello idealizzato di Galileo possa costituirne un’adeguata rappresentazione. È noto, infatti, che la legge formulata da Galileo è rigorosamente valida solo se riferita al caso ideale nel vuoto (caso che oggi è proponibile realmente) e che – di conseguenza – può fornire un’approssimazione molto buona di come si comportano i corpi reali esclusivamente nelle situazioni in cui la resistenza del mezzo è irrilevante. L’ostacolo, in questo caso, consiste evidentemente nel saper stabilire in quali circostanze sia lecito trascurare la resistenza dell’aria ovvero nel delimitare l’ambito di validità del modello idealizzato.

L’effetto della resistenza dell’aria sul moto dei gravi è un problema con cui Galileo si è confrontato lungo tutto l’arco della sua attività scientifica riuscendo, grazie all’osservazione qualitativa e alla sperimentazione, ad individuare correttamente i fattori responsabili delle differenti velocità di caduta, come peraltro mostra la seguente citazione dai *Discorsi*:

Quanto poi al perturbamento procedente dall’impedimento del mezo, questo è più considerabile, e, per la sua tanto multiplice varietà, incapace di poter sotto regole ferme esser compreso e datone scienza; atteso che, se noi metteremo in considerazione il solo impedimento che arreca l’aria a i moti considerati da noi, questo si troverà perturbargli tutti, e perturbargli in modi infiniti, secondo che in infiniti modi si variano le figure, le gravità e le velocità de i mobili<sup>128</sup>.

Quando un corpo si muove immerso in un fluido come l’aria o l’acqua, il fluido esercita una forza ritardatrice (detta anche forza resistente o resistenza del mezzo) che tende a ridurre la velocità del corpo. Parimenti alla forza d’attrito, anche questo tipo di forza è sempre presente nel mondo reale, presentando vantaggi e svantaggi a seconda dei casi<sup>129</sup>. Non si tratta di una

---

<sup>128</sup> G. Galileo, , *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., p. 257.

<sup>129</sup> Si pensi, ad esempio, all’effetto paracadute.

forza costante: il fattore che maggiormente la influenza è velocità relativa del corpo rispetto al fluido, a cui si aggiungono la forma e le dimensioni del corpo nonché le proprietà del fluido stesso. Per piccole velocità la resistenza del mezzo cresce in maniera direttamente proporzionale alla velocità del corpo, mentre per velocità maggiori tende a essere direttamente proporzionale al suo quadrato: nel primo caso si parla di resistenza viscosa nel secondo di resistenza turbolenta<sup>130</sup>.

Proseguendo nella sua argomentazione, scrive Galileo:

Imperò che, quanto alla velocità, secondo che questa sarà maggiore, maggiore sarà il contrasto fattogli dall'aria; la quale anco impedirà più i mobili secondo che saranno men gravi: talché, se bene il grave descendente dovrebbe andare accelerandosi in duplicata proporzione della durazion del suo moto, tuttavia, per gravissimo che fusse il mobile, nel venir da grandissime altezze sarà tale l'impedimento dell'aria, che gli torrà il poter crescere più la sua velocità, e lo ridurrà ad un moto uniforme ed equabile; e questa adeguazione tanto più presto ed in minori altezze si otterrà, quanto il mobile sarà men grave. Quel moto anco che nel piano orizzontale, rimossi tutti gli altri ostacoli, dovrebbe essere equabile e perpetuo, verrà dall'impedimento dell'aria alterato, e finalmente fermato: e qui ancora tanto più presto, quanto il mobile sarà più leggero<sup>131</sup>.

Lo scienziato pisano giunge così a formulare qualitativamente il concetto di velocità limite – a cui Newton darà successivamente un'adeguata veste matematica<sup>132</sup> – ponendola in relazione diretta con il peso del corpo e inversa con il fattore di attrito sul quale incide la densità del mezzo. In situazioni reali, ovvero in presenza di un mezzo ambiente, un corpo abbandonato a sé stesso dalla condizione di quiete cade sotto l'influenza rispettivamente della forza di gravità – supposta costante – e di una forza resistente funzione della velocità di caduta, entrambe dirette verticalmente ma con versi opposti. Col trascorrere del tempo (che dipende dall'altezza di

---

<sup>130</sup> Su questi aspetti si vedano, ad esempio, P. A. Tipler, *Meccanica, onde, termodinamica*, cit., pp. 139-140; L. Landau, A. Kitaigorodskij, *La fisica per tutti*, cit., pp. 293-297.

<sup>131</sup> G. Galileo, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., p. 257.

<sup>132</sup> A. Fropa, *Parola di Galileo*, cit., pp. 65-68.

caduta) il moto inizialmente accelerato evolve verso una condizione a regime di velocità costante (velocità terminale): al crescere della velocità del corpo, infatti, la forza resistente aumenta fino a pareggiare la forza di gravità. Annullata l'accelerazione, il corpo prosegue dunque, come vuole il principio d'inerzia, con moto rettilineo uniforme.

Illustrati a Simplicio i molteplici fattori che agiscono sul comportamento dei corpi in situazioni reali, Galileo cerca quindi di giustificare il suo ricorso al caso idealizzato argomentando – erroneamente, ma per comprensibili motivi – contro una possibile stima quantitativa degli «accidenti della materia»:

De i quali accidenti di gravità, di velocità, ed anco di figura, come variabili in modi infiniti, non si può dar ferma scienza: e però, per poter scientificamente trattar cotal materia, bisogna astrar da essi, e ritrovate e dimostrate le conclusioni astratte da gl'impedimenti, servircene, nel praticarle, con quelle limitazioni che l'esperienza ci verrà insegnando. E non però piccolo sarà l'utile, perché le materie e lor figure saranno elette le men soggette a gl'impedimenti del mezo, quali sono le gravissime e le rotonde, e gli spazii e le velocità per lo più non saranno sì grandi, che le loro esorbitanze non possano con facil tara esser ridotte a segno; anzi pure ne i proietti praticabili da noi, che siano di materie gravi e di figura rotonda, ed anco di materie men gravi e di figura cilindrica, come frecce, lanciati con frombe o archi, insensibile sarà del tutto lo svario del lor moto dall'esatta figura parabolica<sup>133</sup>.

Vista la difficoltà che tutt'oggi si riscontra nel determinare tali forze di resistenza, non deve sorprendere che Galileo suggerisca inizialmente di non tenerne conto nella rappresentazione matematica del fenomeno: dando così prova di ciò che potremmo definire “l'abito mentale” proprio del fisico, lo scienziato invita innanzitutto a «difalcare gli impedimenti della materia» attraverso un passaggio al caso limite, per poi – in un secondo tempo – sottoporre tale costruzione idealizzata al vaglio dell'esperienza, al fine di stabilire i limiti entro cui può debitamente considerarsi un'approssimazione accettabile di situazioni reali. Si può qui riconoscere – al momento ancora al

---

<sup>133</sup> G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., p. 257.



suo stato embrionale – la distinzione tra la fase teorica di costruzione del modello e la fase sperimentale della sua validazione, ostacolo epistemologico correlabile a una vasta fenomenologia di misconcezioni, talvolta corroborate da pratiche traspositive ispirate unilateralmente da filosofie implicite di stampo razionalista o empirista.

Chiarito il punto di vista di Galileo e la sua formulazione qualitativa del concetto chiave di velocità limite, torniamo ora al quesito iniziale, ovvero alla definizione delle condizioni alle quali è trascurabile l'influenza dell'aria sul moto dei gravi, quesito a cui – per la mancanza di strumenti matematici e di tecniche sperimentali adeguate – lo scienziato non ha potuto fornire una risposta precisa. A questo fine ci serviremo di due esempi paradigmatici – la caduta di una sfera inizialmente in quiete e il lancio dei proiettili<sup>134</sup> – che descriveremo analiticamente prestando attenzione non tanto ai passaggi matematici quanto alle operazioni concettuali ad essi sottese.

Una sfera di velocità  $v$  immersa in un fluido è soggetta ad una forza di resistenza del mezzo che, per oggetti macroscopici e/o velocità abbastanza grandi, può essere così formulata

$$F_R = \frac{1}{2} C \rho_F S v^2$$

dove  $\rho_F$  rappresenta la densità del fluido (per l'aria si assume  $\rho_F = \rho_A = 1,23\text{kg}$ ),  $S$  la “sezione frontale” (per una sfera di raggio  $r$ ,  $S = \pi r^2$ ) e  $C$  il “coefficiente di penetrazione”, il quale in generale dipende dalla velocità ( $C = C(v)$ ), ma di norma si può approssimare con una costante: nel caso della sfera  $C = 0,5$ . Tale forza, come già specificato in precedenza, è opposta al moto.

---

<sup>134</sup> Entrambi gli esempi sono tratti dal materiale didattico a cura del Prof. Fernando Scarlassara per il corso di Fisica 1 rivolto a studenti di Ingegneria (unipd), consultabile all'indirizzo [http://www.pd.infn.it/~scarlass/fisica1\\_ing/lucidi/nota\\_resistenza-aria.pdf](http://www.pd.infn.it/~scarlass/fisica1_ing/lucidi/nota_resistenza-aria.pdf)

Assumendo positiva la direzione verticale orientata verso il basso, per una sfera in caduta l'equazione del moto è:

$$mg - \frac{1}{2}C\rho_A S v^2 = ma$$

Da tale equazione è possibile trarre importanti conclusioni sulle condizioni alle quali è lecito trascurare la resistenza dell'aria, condizioni verificate qualora l'intensità della forza resistente sia piccola rispetto a quella della forza peso, ovvero se la velocità della sfera soddisfa la relazione:

$$v \ll \sqrt{\frac{2mg}{C\rho_A S}} = v_l$$

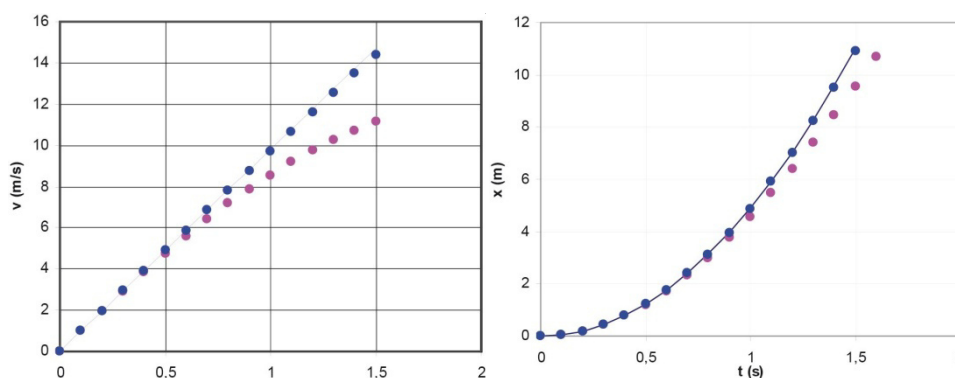
dove  $v_l$  rappresenta la velocità limite ossia la velocità terminale che il corpo raggiunge quando la forza resistente e la forza peso si pareggiano, ricavabile eguagliando a zero il secondo membro dell'equazione ( $ma = 0$ ).

Per capire se è possibile trascurare la resistenza dell'aria basta confrontare la velocità limite con la velocità massima che sarebbe raggiunta dalla sfera nel vuoto e verificare che quest'ultima risulti ampiamente inferiore alla prima. In caso contrario, se cioè la velocità massima approssima la velocità limite o addirittura la supera notevolmente, ci si devono aspettare correzioni anche molto rilevanti: deviazioni sensibili dal caso limite se  $v_{max} \approx v_L$ , mentre risultati assolutamente non realistici se  $v_{max} \gg v_L$ .

A questo proposito si considerino due sfere, una di legno e una di acciaio, entrambe di raggio  $r = 1$  cm. Poiché le dimensioni sono le medesime mentre la densità è diversa - rispettivamente  $\rho = 500\text{kg/m}^3$  per il legno e  $\rho = 8000\text{kg/m}^3$  per l'acciaio - la massa delle due sfere sarà differente, essendo  $m = \rho V$ , dove  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$  è il volume della sfera.

Assumendo inoltre  $\rho_A = 1,23\text{kg/m}^3$ ,  $C = 0,5$  e considerando  $v_L = \sqrt{\frac{8\rho r g}{3C\rho_A}}$ , si ottiene per la sfera di legno una velocità limite pari a 14,6 m/s che si raggiunge, nel vuoto, con una caduta da un'altezza di 10,8m. Per la sfera di acciaio, invece, la velocità limite vale 58,3 m/s, raggiungibile nel vuoto a partire da un'altezza di 173m.

I grafici qui di seguito riportati i rappresentano la legge oraria  $x(t)$  e la velocità  $v(t)$  per le due sfere di 2 cm di diametro, in caduta da un'altezza di 10m.



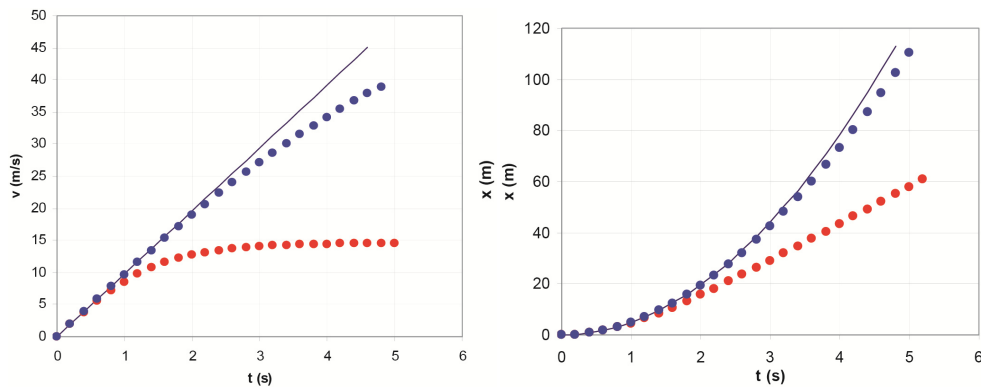
**Fig.1**<sup>135</sup> I punti blu rappresentano la sfera d'acciaio; i punti viola la sfera di legno; la linea continua rappresenta la caduta nel vuoto. La caduta avviene da 10 m.

Dalla figura 1 si evince come, in una caduta da 10m, le differenze rispetto al vuoto siano pressoché impercettibili per la sfera di acciaio; al contrario, la sferetta di legno, notevolmente più leggera della prima e quindi maggiormente soggetta all'influenza della resistenza dell'aria, subisce deviazioni sensibili.

Se si considera, tuttavia, una caduta da un'altezza di 100m (figura 2) la situazione muta anche per la sfera d'acciaio per la quale si osservano

<sup>135</sup> Tutti i grafici che compaiono in questo paragrafo – da noi riproposti solamente per favorire una maggiore chiarezza espositiva – sono tratti dal materiale didattico del Prof. Scarlassara citato in precedenza.

deviazioni rispetto al caso ideale; per la sfera di legno, invece, non esiste addirittura neppure un accordo qualitativo.



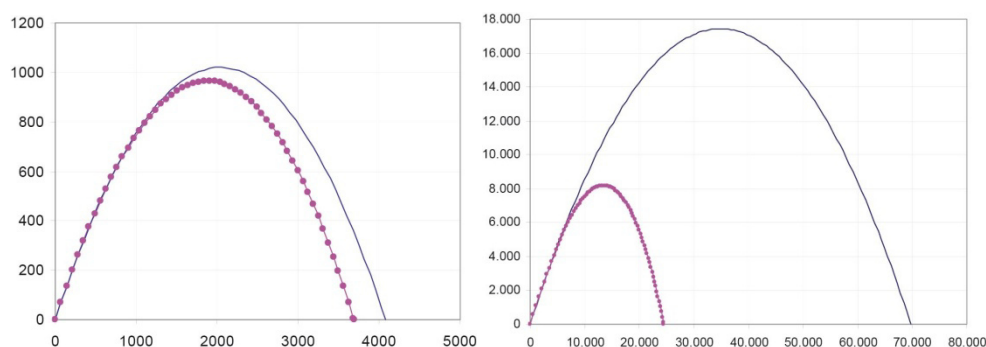
**Fig. 2** I punti blu rappresentano la sfera d'acciaio; i punti rossi la sfera di legno; la linea continua rappresenta la caduta nel vuoto. La caduta avviene da 100 m.

Da queste premesse emerge come sia di fatto improponibile trascurare la resistenza dell'aria per i proiettili di arma da fuoco, ben differenti dai proiettili “lenti” a cui si riferisce Galileo. In questo caso il coefficiente aerodinamico non si può considerare costante perché i proiettili sono spesso supersonici e  $C$  è soggetto a rapide variazioni intorno alla velocità del suono.

La figura 3 riporta le traiettorie di un proiettile di artiglieria calibro 155mm, di 44kg, sparato ad un angolo di  $45^\circ$ . Nel grafico a sinistra dove la velocità iniziale vale circa  $V_0 = 200\text{m/s}$  ed è inferiore alla velocità del suono, il coefficiente  $C$  si può considerare pari a 0,13, mentre nel grafico a destra dove  $V_0 = 827\text{m/s}$  ed è superiore alla velocità del suono  $C$  varia fra 0,13 e 0,34<sup>136</sup>. Calcolando le rispettive velocità limite che, a differenza dell'esempio della caduta, vanno confrontate con quelle iniziali a cui sono sparati i proiettili, si ottiene nel primo caso 960m/s, nel secondo 600m/s.

<sup>136</sup> Valori aggiustati empiricamente per riprodurre alcune gittate riportate in rete, scalando la funzione  $C(v)$  di un fattore costante.

Nel primo caso la velocità massima (allo sparo) è ancora piuttosto piccola rispetto al suo valore limite e la discrepanza fra la traiettoria nel vuoto e quella in aria non è molto grande. Nel secondo caso, al contrario, la velocità massima è addirittura superiore alla velocità limite, ragione per cui lo scostamento tra una traiettoria realistica e quella riferibile al caso ideale è decisamente notevole.



**Fig. 3** Traiettoria di un proiettile di artiglieria (calibro 155, 44kg, sparato a  $45^\circ$ ) a sinistra con velocità iniziale 200m/s, a destra con velocità iniziale 827m/s. I punti rappresentano la traiettoria con resistenza dell'aria, le linee continue la traiettoria che avrebbe seguito in vuoto.

In chiusura, due ordini di considerazioni che assumono una certa rilevanza sul piano pedagogico-didattico. Il primo concerne la funzione paradigmatica svolta dal caso idealizzato nella risoluzione del quesito circa le condizioni a cui è legittimo trascurare la resistenza del mezzo; la possibilità di comparare la velocità terminale raggiungibile dai corpi in aria con quella degli stessi nel vuoto mette chiaramente in evidenza il ruolo “regolativo” del caso limite che funge – appunto – da metro per vagliare i casi reali, evitando così, ove possibile, di dover risolvere la più complicata equazione del moto. In questo modo la scienza beneficia di quelle “falsità” di cui sia Simplicio sia Guidobaldo – sebbene per motivi differenti – condannavano l’utilizzo. Quest’ultimo punto si ricollega così al secondo ordine di considerazioni che

interessa, in particolare, la gestione, a livello traspositivo, del delicato equilibrio tra aspetti formali e aspetti concettuali della fisica.

Come sottolineato nel secondo capitolo, il debito contratto dalla fisica nei confronti della matematica che le fornisce il linguaggio per rappresentare la realtà naturale non deve oscurare la sua dimensione concettuale, pena il restituire un'immagine della disciplina falsata e fuorviante<sup>137</sup>. Gli aspetti formali connessi alla formulazione di modelli più realistici dove si introducono – rispetto al caso idealizzato – fattori correttivi che conducono all'impostazione di equazioni non risolubili analiticamente spesso inducono i docenti ad evitare una trattazione di questi casi, soprattutto in indirizzi scolastici non a carattere strettamente tecnico-scientifico.

Sebbene in parte comprensibile, questo atteggiamento rischia tuttavia di compromettere la comprensione della dinamica stessa del progresso scientifico, che da Newton in poi – come chiarisce Bernard Cohen – «consiste in uno scambio ripetuto fra un costrutto matematico e la realtà fisica»<sup>138</sup>. Emblematico, a questo proposito, l'articolo di Peter Brancazio *Trajectory of a flyball*<sup>139</sup>. Qui l'autore, dopo aver messo in luce la distanza che separa la “palla battuta” (*fly ball*) del giocatore di baseball – la quale risente in larga misura della resistenza dell'aria – dalla “palla battuta” del professore di fisica – che invece viaggia in assenza di attrito dando luogo a una parabola perfetta –, da un lato esorta i docenti ad introdurre concettualmente la forza resistente e i suoi effetti, unitamente al calcolo della velocità limite degli oggetti; dall'altro, li ammonisce dal proporre – senza motivarne adeguatamente le ragioni – esempi che sono chiaramente degli esperimenti mentali come fossero invece modellizzazioni di casi reali dal valore predittivo.

---

<sup>137</sup> Il riferimento in questo caso è in particolare alla ricerca di Oberle e colleghi «the Galileo Bias».

<sup>138</sup> B. I. Cohen, «Newton e la scoperta della gravità», cit.

<sup>139</sup> P. Brancazio, «Trajectory of a Fly Ball», *Journal of Physics Teacher*, 23 (1), Jan. 1985, pp. 20-23.

The arguments and examples presented here lead to the inescapable conclusion that air resistance cannot be neglected when calculating the trajectory of a baseball. The same is true for the others sport projectiles - i.e., footballs, tennis balls, golf balls - that occasionally appear in projectile motion problems. Of course, we cannot expect students in introductory physics course to perform air-resistance calculations. Yet a lecture on projectile motion could certainly contain at least a brief discussion of the drag force and its effects. [...]. In any case, *we should not mislead our students into thinking that the standard equations of projectile motion yield accurate or even approximate values of trajectory parameters when applied to common sport projectiles*<sup>140</sup>.

Di qui una riflessione: la bontà dell'esempio non si misura dalla familiarità della situazione presentata, ma dal suo chiarire la logica sottostante al fenomeno. In questo senso, problemi dove compaiono "proiettili sportivi" per cui l'influenza dell'azione del mezzo sia trascurabile non rispondono ai vincoli che una corretta trasposizione didattica impone: sacrificando, in nome della trattabilità matematica, la comprensione della funzione "regolativa" dei casi idealizzati nella rappresentazione scientifica dei fenomeni naturali, essi tradiscono epistemologicamente il sapere esperto senza renderlo peraltro maggiormente accessibile.

Celando, infatti, il fondamentale meccanismo alla base della modellizzazione – di cui la seguente citazione di Hestenes esplicita i passaggi salienti – questa modalità di trasposizione didattica del sapere non riesce a incidere efficacemente sulla cornice concettuale sottostante alle singole misconcezioni, le quali, pertanto, non solo non vengono corrette o quantomeno contestualizzate, ma ne risultano persino corroborate.

Scriva Hestenes:

[...]. No single model ever captures the full complexity of a real object. However, in principle there is no definite limit to the complexity which can be modeled. The trick is to select the simplest model which can account for the empirical data. This is *Occam's razor* expressed as a *basic principle of model deployment*. The simplest

---

<sup>140</sup> P. Brancazio, «Trajectory of a Fly Ball», cit., p.23.

model for a physical object is, of course, a single particle. This is an adequate model if the dimensions of the object can be neglected, a criterion which can be evaluated both experimentally and theoretically. The theoretical evaluation is carried out by constructing a sequence of models with increasing complexity, so at each stage in the modeling sequence the model can be *deployed* to evaluate what was neglected in the previous stage. This is an important modeling strategy, which might be called the *principle of successive refinements*. It should not be surprising that the first great application of this principle is to be found in the *Principia*, because Newton was the first person to know all the rules of the modeling game<sup>141</sup>.

Lo «stile newtoniano» – espressione coniata da Cohen per indicare il peculiare modo di procedere dello scienziato<sup>142</sup> – si traduce, infatti, nell’indagare la realtà naturale utilizzando modelli matematici che, a partire da versioni inizialmente semplificate, evolvono, attraverso il ripetuto confronto con dati ricavati empiricamente (modelli dei dati), in modelli più complessi, i quali condividono – per dirla con Giere – un maggiore grado di somiglianza con i sistemi empirici correlati.

All’acquisizione di questo «stile», traguardo a cui dovrebbe ambire un’autentica educazione scientifica, non si giunge, tuttavia, grazie ad alcuna “via regia”, ma solo – e la storia della disciplina ne è testimone – percorrendo una strada lastricata di ostacoli di cui il presente lavoro ha cercato di offrire una prima parziale classificazione.

---

<sup>141</sup> D. Hestenes, «Modeling Game in the Newtonian World», cit., pp. 738-739.

<sup>142</sup> B. I. Cohen, «Newton e la scoperta della gravità», cit., p. 134.



# APPENDICE

Questionario sottoposto agli studenti frequentanti il laboratorio di Fisica (a.a. 2014-2015, primo semestre) afferente al corso di laurea in Scienze della Formazione Primaria dell'Università di Urbino.

1. Se una palla piccola e una palla grande (dello stesso peso) vengono lasciate cadere dalla cima di Palazzo Albani, quale delle due colpirà il suolo per prima?

- a) La palla piccola
- b) Entrambe contemporaneamente
- c) La palla grande

2. Se una palla leggera e una palla pesante (delle medesime dimensioni) vengono lasciate cadere dalla cima di Palazzo Albani, quale delle due colpirà il suolo per prima?

- a) La palla leggera
- b) Entrambe contemporaneamente
- c) La palla pesante

3. Se un foglio di carta e una pallina di acciaio vengono lasciati cadere da un'altezza di circa 40 cm, quale tra i due arriverà per primo al suolo?

- a) Il foglio di carta
- b) La pallina di acciaio
- c) Entrambi contemporaneamente

4. Supponiamo di accartocciare il foglio a forma di palla e ripetiamo l'esperienza. Quale tra i due arriverà per primo al suolo?

- a) La pallina di carta
- b) La pallina di acciaio
- c) Entrambe contemporaneamente

5. Se ripetessimo la (3) e la (4) in assenza d'aria cambierebbe qualcosa? Motiva la risposta

- a) Sì in entrambi i casi
- b) Sì nel secondo caso ma non nel primo
- c) In nessuno dei due casi
- d) Sì nel primo caso ma non nel secondo

6. Leghiamo due sfere uguali, una di piombo e una di sughero a due fili di uguale lunghezza e con una spinta facciamo compiere loro delle oscillazioni di piccola ampiezza. In assenza di attrito,

- quale di esse oscilla più velocemente?

- a) La sfera di sughero
- b) La sfera di piombo
- c) Entrambe hanno la stessa velocità di oscillazione

- quale delle due si ferma per prima?

- a) La sfera di sughero
- b) La sfera di piombo
- c) Entrambe contemporaneamente
- d) Nessuna delle due
- e) Non abbiamo informazioni sufficienti per stabilirlo

7. Una sfera di legno e una di acciaio, entrambe del diametro di 2 cm, vengono fatte cadere da un'altezza di circa un metro. Quale delle due arriva per prima a terra?

- a) La sfera di acciaio
- b) Entrambe contemporaneamente solo in assenza d'aria (nel vuoto).
- c) La sfera di legno
- d) Entrambe contemporaneamente

8. Ripetiamo l'esperienza da un'altezza di 10 m: Quale delle due arriva per prima a terra?

- a) La sfera di acciaio
- b) Entrambe contemporaneamente
- c) La sfera di legno
- d) Entrambe contemporaneamente solo in assenza d'aria (nel vuoto).

9. Lanciamo in verticale, con uguale velocità, una pallina di sughero e una di piombo. Quale delle due raggiungerà l'altezza maggiore in assenza d'aria?

- a) La pallina di sughero
- b) Entrambe
- c) La pallina di piombo
- d) Non abbiamo informazioni sufficienti per stabilirlo

10. Supponiamo di avere due scatole uguali, una vuota e una piena di libri. Diamo una spinta uguale ad entrambe, lungo una superficie liscia. In assenza di attrito, quale scatola si fermerà per prima?

- a) La scatola vuota
- b) Nessuna delle due si ferma
- c) Non abbiamo informazioni sufficienti per stabilirlo
- d) La scatola piena
- e) Entrambe contemporaneamente

# Bibliografia<sup>1</sup>

- AGAZZI E., PALLADINO D., *Le geometrie non euclidee e i fondamenti della geometria*, La scuola, Brescia, 1998.
- AMALDI U., *Le traiettorie della fisica. Da Galileo a Heisenberg*, Zanichelli, Bologna, 2012.
- AMIGONI F., SCHIAFFONATI V., «A Multiagent Approach to Modelling Complex Phenomena», *Foundations of Science*, Springer, 13(2), 2008, pp. 113-125.
- AMORETTI C., VASSALLO N., *Piccolo trattato di epistemologia*, Codice edizioni, Torino, 2010.
- ANOLLI L., LEGRENZI P., *Psicologia generale*, Il mulino, Bologna, 2012.
- ANTISERI D., *Didattica delle scienze*, Armando Editore, Roma, 2000.
- AUSUBEL D. P., *Educazione e processi cognitivi: guida psicologica per gli insegnanti*, Franco Angeli, Milano, 1998.
- BACHELARD G. (1938), *La formazione dello spirito scientifico: contributo a una psicoanalisi della conoscenza oggettiva*, a cura di E. Castelli Gattinara, R. Cortina, Milano, 1995.
- BALDACCI M., *Una scuola a misura d'alunno*, Torino, Utet, 2002.
- BALDACCI M., *Il problematicismo: dalla filosofia dell'educazione alla pedagogia come scienza*, Lecce, Milella, 2003.
- BALDACCI M., «I modelli della didattica nell'epoca della società conoscitiva», in M. Baldacci (a cura di), *I modelli della didattica*, Carocci, Roma, 2004, pp. 13-59.
- BALDACCI M., *Ripensare il curriculum: principi educativi e strategie didattiche*, Carocci, Roma, 2006.
- BALDACCI M., «Teoria, prassi e “modello” in pedagogia. Un'interpretazione della prospettiva problematicista», *Education Sciences & Society*, anno 1, 1, 2010, pp. 65-76.

---

<sup>1</sup> Dei testi composti prima del 1960 è stata riportata, oltre alla data dell'edizione consultata, anche la data della prima pubblicazione e, per i testi tradotti, anche il nome del curatore/traduttore.

- BALDACCI M., *La dimensione metodologica del curricolo: il modello del metodo didattico*, Franco Angeli, Milano, 2010.
- BALDACCI M., «Il curricolo e i suoi livelli logici», in L. Binanti e D. Ria (a cura di), *La ricerca educativa e formativa in Italia oggi*, Anicia, Roma 2010, pp. 17-25.
- BALDACCI M., *Trattato di pedagogia generale*, Carocci, Roma, 2012.
- BATESON G., *Verso un'ecologia della mente*, Adelphi, Milano, 2007.
- BATTERMAN R. W., «Idealization and modelling», *Synthese*, 169 (3), 2009, pp. 427-446.
- BELLONE E., *Galileo: le opere e i giorni di una mente inquieta*, Le Scienze, Milano, 1998.
- BERTI A. E., «Cambiamento concettuale e insegnamento», *Scuola e città*, 1, 2000, pp. 18-38, disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.edscuola.it/archivio/antologia/scuolacitta/berti.pdf>.
- BINGHAM G. P., RUNESON S., «On describing what is perceived: Seeing "velocity" versus seeing "push" in moving objects». Paper presented at the meeting of the International Society for Ecological Psychology (October, 1983), Nashville (TN).
- BONICALZI F., «Il Concetto di Modello. Aspetti storici e questioni teoriche», *Emmeciquadro*, 10, 2000, disponibile all'indirizzo Internet: [www.ilsussidiario.net/News/emmeciquadro/Emmeciquadro-n-10/2000/12/14/SCIENZAINATTO-Il-Concetto-di-Modello-Aspetti-storici-e-questioni-tecniche/233852/](http://www.ilsussidiario.net/News/emmeciquadro/Emmeciquadro-n-10/2000/12/14/SCIENZAINATTO-Il-Concetto-di-Modello-Aspetti-storici-e-questioni-tecniche/233852/).
- BONICALZI F., *Leggere Bachelard: le ragioni del sapere*, JacaBook, Milano, 2007.
- BOZZI P., «Le condizioni del movimento "naturale" lungo i piani inclinati», *Rivista di psicologia*, 53(2), 1959, pp. 337-352.
- BOZZI P., «Analisi fenomenologica del moto pendolare armonico», *Rivista di Psicologia*, 52(4), 1958, pp. 281-302.
- BOZZI P., «Fenomenologia del movimento e dinamica pregalileiana», *Aut Aut*, 64 (3), 1961, pp. 377-393.
- BOZZI P., «Sulla preistoria della fisica ingenua», *Sistemi Intelligenti*, 1(1), 1989, pp. 61-74.
- BOZZI P., *Fisica ingenua. Oscillazioni, piani inclinati e altre storie: studi di psicologia della percezione*, Garzanti Milano, 1990.
- BOZZI P., «Le ragioni di Simplicio ossia la base percettiva del moto pendolare e della discesa lungo i piani inclinati», in M. Baldo Ceolin (a cura di), *Galileo e la scienza sperimentale*, Padova, Dipartimento di Fisica "Galileo Galilei", 1995, pp. 105-132.
- BOZZI P., *Vedere come. Commenti ai parr. 1-29 delle Osservazioni sulla filosofia della psicologia di Wittgenstein*, Guerini e Associati Milano, 1998.
- BONIOLO G., *Metodo e rappresentazioni del mondo: per un'altra filosofia della scienza*, Mondadori, Milano, 1999.
- BONIOLO G., VIDALI P., *Introduzione alla filosofia della scienza*, Mondadori, Milano, 2003, pp. 35-42.

- BOSCO F. M., «Linguaggio e comunicazione», in G. Pravettoni, M. Miglioretti (a cura di), *Processi cognitivi e personalità. Introduzione alla psicologia*, Franco Angeli, Milano, 2003, pp. 159-180.
- BRANCAZIO P., «Trajectory of a Fly Ball», *Journal of Physics Teacher*, 23 (1), Jan. 1985, pp. 20-23.
- BROUSSEAU G., «Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques», *Recherches en didactique des mathématiques*, 4(3), 1983, pp. 165-198.
- CAMBI F., «Scienza, scuola, museo: un “circolo virtuoso”», in F. Cambi, F. Gattini, (a cura di), *La scienza nella scuola e nel museo: percorsi di sperimentazione in classe e La scienza nella scuola e nel museo. Percorsi di sperimentazione in classe e al museo*, Roma, Armando, 2007, pp. 21-34.
- CAMBI F., «Scienza, immagine della scienza e insegnamento delle scienze», in F. Cambi, L. Barsantini, D. Polverin (a cura di), *Formare alla scienza nella scuola secondaria di secondo grado*, pp. 15-24.
- CANIGLIA G., «Organismi esemplari. Osservazioni epistemologiche di ordine descrittivo», *Humana.Mente*, 6, 2008, pp. 101-128.
- CARAMAZZA A., MCCLOSKEY M., GREEN B., «Curvilinear motion in the absence of external forces: naive beliefs about the motion of objects», *Science* 210 (4474), 1980, pp. 1139-1141.
- CARAMAZZA A., MCCLOSKEY M., GREEN B., «Naive beliefs in “sophisticated” subjects: Misconceptions about trajectories of objects», *Cognition* 9(2), 1981, pp. 117-123.
- CARAVITA S., HALLDÉN O., «Re-framing the problem of conceptual change», *Learning and Instruction*, 4(1), 1994, pp. 89-111.
- CAREY S., *Conceptual change in childhood*, MIT Press, Cambridge (MA), 1985.
- CARTWRIGHT N., *How the laws of physics lie*, Oxford University Press, New York, 1983.
- CARTWRIGHT N., *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- CASAMONTI M., «Kuhn, Polanyi e Wittgenstein sul significato: esemplari, conoscenza tacita e giochi linguistici», *Rivista di Storia della Filosofia*, 2, 1999, pp. 283-308.
- CHALMERS A. F., *What Is This Thing Called Science?*, Open University Press, Buckingham, 1999.
- CHAMPAGNE A. B., KLOPFER L. E., ANDERSON J. H., «Factors Influencing the Learning of Classical Mechanics», *American Journal of Physics*, 48(12), 1980, pp. 1074-1079.
- CHEVALLARD Y., *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*, La Pensée Sauvage, Grenoble, 1985.
- CHEVALLARD Y., JOSHUA M. A., «Une exemple d’analyse de la trasposition didactique», *Reserches en Didactique des Mathématiques*, 3(1), 1982, pp. 159-239.

- CHEVALLARD Y., «Concepts fondamentaux de la didactique: perspectives apportées par une approche anthropologique», *Recherches en didactique des mathématiques*, 12 (1), 1992, pp. 73-112.
- CHI M. T. H., SLOTTA J. D., DE LEEUW N., «From things to processes: a theory of conceptual change for learning science concepts», *Learning and Instruction*, 4(1), 1994, pp. 27-43.
- CHINN C. A., BREWER W. F., «The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implication for science instruction», *Review of Educational Research*, 63(1), 1993, pp. 1-49.
- CINI M., *Un paradiso perduto. Dall'universo delle leggi naturali al mondo dei processi evolutivi*, Feltrinelli, Milano, 1994.
- CLAGETT M., *La scienza della meccanica nel medioevo*, Feltrinelli, Milano, 1981.
- CLARK H.H., BRENNAN S. E., «Grounding in communication», in L.B Resnick, J.M. Levine, S.D. Teasley (a cura di), *Perspectives on socially shared cognition*, American Psychological Association, Washington, 1991, pp. 127-149.
- CLARK H. H., «Context and common ground», in A. Barber, R. J. Stainton (a cura di), *Concise Encyclopedia of Philosophy of Language and Linguistics*, Elsevier, Amsterdam, 2010, pp. 85-87.
- CLEMENT J., «Students' preconceptions in introductory mechanics», *The American Journal of Physics*, 50(1), 1982, pp. 66-71.
- COHEN I. B., «Newton e la scoperta della gravità», *Le Scienze*, 153, maggio 1981, anno XIV, volume XXVI, pp. 124-136.
- CONIGLIONE F., *Introduzione alla filosofia della scienza: un approccio storico*, Bonanno, Acireale, 2004.
- COSTA V., *L'estetica trascendentale fenomenologica. Sensibilità e razionalità nell'opera di Edmund Husserl*, Vita e Pensiero, Milano, 1999.
- CREASE R., *Il prisma e il pendolo*. Longanesi, Milano, 2007.
- DAMIANO E., *Il sapere dell'insegnare*, FrancoAngeli, Milano, 2007.
- DAMIANO E., *La mediazione didattica: per una teoria dell'insegnamento*, Franco Angeli, Milano, 2013.
- D'AMORE B., «Il ruolo dell'Epistemologia nella formazione degli insegnanti di Matematica nella scuola secondaria», *La matematica e la sua didattica*, 4, 2004, pp. 4-30.
- D'AMORE B., «Didattica della matematica "C"», in S. Sbaragli, (a cura di), *La matematica e la sua didattica, vent'anni di impegno*. Atti del Convegno Internazionale omonimo, Castel San Pietro Terme (Bo), 23 settembre 2006, Pitagora, Bologna, 2006, pp. 93-96. D'Amore B., Fandiño Pinilla M. I., «Che problema i problemi!», *L'insegnamento della matematica e delle scienze integrate*, 29(6), 2006, pp. 645-664.
- D'AMORE B., «Prefazione» in G. Brousseau, *Ingegneria didattica ed Epistemologia della Matematica*, Pitagora, Bologna, 2008, pp. VII-IX.

- D'AMORE B., FANDINO PINILLA M. I., MARAZZANI I., SBARAGLI S., *La didattica e le difficoltà in matematica*, Erickson, Gardolo (TN), 2008.
- D'AMORE B., FANDINO PINILLA M. I., «La formazione degli insegnanti di matematica, problema pedagogico, didattico e culturale», in F. Frabboni, M. L. Giovannini (a cura di), *Professione insegnante*, Franco Angeli, Milano, 2009, pp. 145-153.
- D'AMORE B., RADFORD L. BAGNI G. T., «Ostacoli epistemologici e prospettive socioculturali», *L'insegnamento della matematica e delle scienze integrate*, 29B, 1, 2006, pp. 11-40.
- DELLANTONIO S., «Recensione a M. Tomasello, Le origini della comunicazione umana», in *Rivista internazionale di filosofia e psicologia*, 1 (1-2), 2010, p. 97-99.
- DE PALMA V., «Scienza ed esperienza prescientifica nell'interpretazione husserliana di Galileo», in *Fondamenti e filosofia della fisica*, a cura di V. Fano, Il Ponte Vecchio, Cesena, 1996, pp. 263-276.
- DEWEY J. (1910), *Come pensiamo*, a cura di A. Guccione Monroy, Firenze, La Nuova Italia, 1961.
- DEWEY J. (1938), *Esperienza e educazione*, a cura di E. Codignola, La Nuova Italia, Firenze, 1996.
- DI SESSA A., «Knowledge in pieces», in G. Forman, P. Pufall (a cura di), *Constructivism in the Computer Age*, LEA, Hillsdale (NJ), 1988, pp. 49-70.
- DORATO M., *Il software dell'universo: saggio sulle leggi di natura*, Bruno Mondadori, Milano, 2000, p. 150 e seg.
- DOWNES S. M., «The Importance of Models in Theorizing: A Deflationary Semantic View», in *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1, 1992, pp. 142-153.
- DRAKE S., DRABKIN I. E. (a cura di), *Mechanics in sixteenth-century Italy: Selections from Tartaglia, Benedetti, Guidobaldo & Galileo*, University of Wisconsin Press, Madison, 1969.
- EINSTEIN A. (1921), «Geometria ed esperienza» in Id., *La relatività: esposizione divulgativa e altri saggi*, tr. di G. Testa, Newton Compton, Roma 1970, pp. 137-156.
- EINSTEIN A., INFELD L. (1938), *L'evoluzione della fisica. Sviluppo delle idee dai concetti iniziali alla relatività e ai quanti*, a cura di C. Castagnoli, Bollati Boringhieri, 2007.
- ENRIQUES F. (1936), *Il significato della storia del pensiero scientifico*, Barbieri, Manduria (TA), 2004.
- FANDINO PINILLA M. I., «Trasposizione, ostacoli epistemologici e didattici: quel che imparano gli allievi dipende da noi. Il caso emblematico di frazioni, area e perimetro», in S. Sbaragli (a cura di), *La matematica e la sua didattica, vent'anni di impegno*. Atti del Convegno Internazionale omonimo, Castel San Piretro Terme (BO), 23 settembre 2006, Pitagora, Bologna, 2006, pp. 117-120.

- FANO V., *Matematica ed esperienza nella fisica moderna*, Accademia Nazionale di Scienze Lettere e Arti Modena, Il Ponte Vecchio, Cesena, 1996;
- FANO V., *Comprendere la scienza: un'introduzione all'epistemologia delle scienze naturali*, Liguori, Napoli, 2005.
- FANO V., «Verso una teoria integrata dello spazio», *Teorie & Modelli*, XII, 2007, pp. 33-59.
- FEINBERG G., «Falls of Bodies Near the Earth», *American Journal of Physics*, 33(6), 1965, pp. 501-502.
- FEYERABEND P., *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza*, Milano, Feltrinelli, 2002.
- FIorentini C., «Immagini della scienza e competenze scientifiche», in F. Cambi, M. Piscitelli, *Complessità e narrazione*, Armando, Roma, 2005, pp. 85-114.
- FISCHBEIN E., STAVY R., MA-NAIM H., «La struttura psicologica dell'idea ingenua di impulso», in B. D'Amore, G. Vergnaud (a cura di), *Matematica a scuola: teorie ed esperienze*, 6, 1992, pp. 39-50.
- FREUDENTHAL H. (a cura di), *The concept and the role of the model in mathematics and natural and social sciences: proceedings of the Colloquium sponsored by the Division of philosophy of sciences of the International union of history and philosophy of sciences* (Utrecht, January 1960), Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1961.
- FRICK. A., HUBER S., REIPS U. D., KRIST H., «Task-Specific knowledge of the law of pendulum motion in children and adults», *Swiss Journal of Psychology*, 64 (2), 2005, pp. 103-114.
- FROVA A., MARENZANA M., *Parola di Galileo*, Bur, Milano, 1998.
- GALAVOTTI M. C., «On Patrick Suppes' philosophy of science», in P. Humphreys (a cura di), *Patrick Suppes: Scientific Philosopher*, 3, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NE), 1994, pp. 245-264.
- GALILEI G. (1623), *Il Saggiatore*, a cura di L. Sosio, Feltrinelli, Milano, 1979.
- GALILEI G. (1632), *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano*, a cura di L. Sosio, Einaudi, Torino, 1970.
- GALILEI G. (1638), *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, a cura di Enrico Giusti, Einaudi, Torino, 1990.
- GALILEI G., *On motion and On mechanics: comprising De motu* (ca. 1590), transl., with introd. and notes, by I. E. Drabkin; and *Le meccaniche* (ca. 1600) transl. with introd. and notes by Stillman Drake, University of Wisconsin Press, Madison, 1960.
- GARDNER H., *Educare al comprendere. Stereotipi infantili e apprendimento scolastico*, Feltrinelli, Milano, 1996.
- GARRISON J. W., «Husserl, Galileo and the Processes of Idealization», *Synthese*, 66 (2), 1986, pp. 329-338.



- GEYMONAT L., «Introduzione», in G. Galilei, *Sensate esperienze e certe dimostrazioni*, antologia a cura di F. Brunetti, L. Geymonat, Laterza, Bari, 1961, pp. 5-37.
- GEYMONAT L., *Galileo Galilei*, Einaudi, Torino, 1969.
- GIERE R., «Visual Models and Scientific Judgment», in B. S. Baigrie (a cura di), *Picturing Knowledge: Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science*, University of Toronto Press, Toronto, 1996, pp. 269-302.
- GIERE R., «Using Models to Represent Reality», in L. Magnani, N. J. Nersessian, P. Thagard (a cura di), *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, Kluwer/Plenum, New York, 1999, pp. 41-57.
- GIERE R., «Representing with physical models», in P. Humphreys, C. Imbert (a cura di), *Models, Simulations, and Representations*, Routledge, New York, 2012, pp. 209-215.
- GIERE R., «An Agent-Based Conception of Models and Scientific Representation», *Synthese*, 172 (2), 2010, pp. 269–281, p. 270.
- GIERE R., «How Models Are Used to Represent Reality», *Philosophy of Science*, 71(5), 2004, pp. 742–752.
- GIERE R., *Spiegare la scienza: un approccio cognitivista*, Il mulino, Bologna, 1996.
- GIERE R., «Models, Metaphysics and Methodology», in S. Hartmann, C. Hoefer, L. Bovens (a cura di), *Nancy Cartwright's Philosophy of Science*, Routledge, New York, 2008, pp. 123-136.
- Gigli R., «Galileo e i calcoli sulla nova del 1572: Un'anticipazione della legge di Gauss nel *Dialogo sui massimi sistemi*», in P. Tucci (a cura di), *Atti del XVI Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Centro Volta, Villa Olmo, Como, 24-25 maggio 1996*, Gruppo di lavoro per le celebrazioni voltiane, Como, 1996, disponibile anche all'indirizzo Internet: <http://www.brera.unimi.it/sisfa/atti/1996/gigli.html>.
- GIUSTI E., «Galilei e le sue leggi del moto», in G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, cit., pp. IX-LXIII.
- GOODMAN N., *I linguaggi dell'arte*, Il saggiatore, Milano, 2013.
- Grice P., *Logica e conversazione: saggi su intenzione, significato e comunicazione*, Il mulino, Bologna, 1993.
- GRIMELLINI TOMASINI N., SEGRÈ G. (a cura di), *Conoscenze scientifiche: le rappresentazioni mentali degli studenti*, Firenze, La Nuova Italia, 1991.
- GUERREGGIO A., *Il mestiere di matematico*, disponibile all'indirizzo Internet: <http://matematica-old.unibocconi.it/guerraggio/mestiere2.htm>.
- GUERREGGIO A., *Matematica*, Egea, Milano, 2012.
- GUERREGGIO A., *15 grandi idee matematiche che hanno cambiato la storia*, Mondadori, Milano, 2013.

- HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J., *Fondamenti di Fisica*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2015
- HARRIS T., «Data Models and the Acquisition and Manipulation of Data», *Philosophy of Science*, 70 (5), 2003, pp. 1508–1517.
- HESSE M., *Models and analogies in science*, Sheed & Ward, London, New York, 1963.
- HESTENES D., «Modeling Game in the Newtonian World», *American Journal of Physics*, 60(8), 1992, pp. 732-748.
- HESTENES D., *New foundations for classical mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NE), 1993.
- HILBERT D. (1899), *Fondamenti della geometria*, a cura di C. F. Manara, Feltrinelli, Milano, 1970.
- HOLMES F., *Meselson, Stahl, and the Replication of DNA: A History of «The Most Beautiful Experiment in Biology»*, Yale University Press, New Haven 2001.
- HUSSERL E. (1892/3), «I molteplici significati del termine spazio», in Id., *Libro dello spazio*, a cura di V. Costa, Guerini, Milano, 1996, pp. 65-71.
- HUSSERL E. (1901), *Ricerche Logiche*, II, tr. it. a cura di G. Piana, Il Saggiatore, Milano, 2005.
- HUSSERL E. (1954), *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale. Introduzione alla filosofia fenomenologica*, tr. di E. Filippini, Il Saggiatore, Milano, 1983.
- HUSSERL E. (1913), *Idee per una fenomenologia pura e per una filosofia fenomenologica*, Libro primo: *Introduzione generale alla fenomenologia pura (Idee I)*, a cura di V. Costa e E. Franzini, Einaudi, Torino, 2002.
- HUSSERL E. (1952), *Idee per una fenomenologia pura e una filosofia fenomenologica*. Libro secondo: *Ricerche fenomenologiche sopra la costituzione*; Libro terzo: *La fenomenologia e i fondamenti delle scienze*, a cura di V. Costa e E. Franzini, Einaudi, Torino, 2002.
- ISRAEL G., IANNELLI M., «Modellistica matematica», *Enciclopedia Italiana Treccani*, disponibile all'indirizzo Internet: [http://www.treccani.it/enciclopedia/modellistica-matematica\\_\(Enciclopedia-Italiana\)](http://www.treccani.it/enciclopedia/modellistica-matematica_(Enciclopedia-Italiana)).
- KOERTGE N., «Galileo and the Problem of Accidents», *Journal of the History of Ideas*, 38 (3), 1977, pp. 389-408.
- KOYRÉ A. (1945), «Galileo e Platone», in *Introduzione alla lettura di Platone*, tr. Di L. Sichirolo, Vallecchi, Firenze, 1956.
- KOYRÉ A. (1939), *Studi galileiani*, tr. di M. Torrini, Einaudi, Torino, 1979.
- KUHN T. S., «La funzione della misura nella scienza fisica moderna» in Id., *La tensione essenziale: cambiamenti e continuità nella scienza*, Einaudi, Torino, 1985, pp. 193-243.
- KUHN T. S., «Nuove riflessioni sui paradigmi» in Id., *La tensione essenziale: cambiamenti e continuità nella scienza*, Einaudi, Torino, 1985, pp. 321-350.

- KUHN T. S., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi, 1999.
- LADYMAN J., «Idealization», in S. Psillos, M. Curd (a cura di), *The Routledge Companion to Philosophy of Science*, Routledge, London/New York, 2008, pp. 358-366.
- LANDAU L., KITAIGORODSKIJ A., *La fisica per tutti*, Editori Riuniti, Roma, 2014.
- LANFREDINI R., «Da una teoria della scienza a una teoria della conoscenza: l'ultimo Kuhn», in C. Sinigaglia, R. Lanfredini, G. Irzik, «Discussione su "Dogma contro critica" di Thomas S. Kuhn», *Iride*, 3, 2000, pp. 625-645.
- LEGRENZI P., *Paolo Bozzi: una biografia intellettuale (ed il tema dei saperi ingenui)*. Relazione tenuta all'Accademia Galileiana di SS.LL.AA. il 30 Gennaio 2007, disponibile all'indirizzo Internet: [https://www.researchgate.net/publication/242756677\\_Paolo\\_Bozzi\\_una\\_biografia\\_intellettuale\\_ed\\_il\\_tema\\_dei\\_saperi\\_ingenui](https://www.researchgate.net/publication/242756677_Paolo_Bozzi_una_biografia_intellettuale_ed_il_tema_dei_saperi_ingenui).
- LEGRENZI P., «La fisica ed altri saperi ingenui», in U. Savardi e A. Mazzocco (a cura di), *Figura e Sfondo, Temi e variazioni per Paolo Bozzi*, Cleup, Padova, 2003, pp. 45-50.
- MACH E. (1883), *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, trad. di A. D'Elia, Boringhieri, Torino, 1992.
- MAC LANE S., «The Reasonable Effectiveness of Mathematical Reasoning», in R. Mickens (a cura di), *Mathematics and Science*, World Scientific, Singapore, 1990, pp. 115-121.
- MANETTI D., ZIPOLI CAIANI S., «Intervista a Bas van Fraassen», *Pianeta Galileo* 2009, consultabile all'indirizzo Internet: [www.consiglio.regione.toscana.it:8085/news-ed-eventi/pianeta-galileo/atti/2009/18\\_manetti.pdf](http://www.consiglio.regione.toscana.it:8085/news-ed-eventi/pianeta-galileo/atti/2009/18_manetti.pdf)
- MANGIONE C., BOZZI S., *Storia della logica. Da Boole ai nostri giorni*, Garzanti, Milano 1993.
- MARTINI B., *Didattiche disciplinari. Aspetti teorici e metodologici*, Pitagora, Bologna, 2000.
- MARTINI B., Sbaragli S., *Insegnare e apprendere la matematica*, Tecnodid, Napoli, 2005.
- MARTINI B., *Formare ai saperi*, FrancoAngeli, Milano, 2005.
- MARTINI B., «Le competenze disciplinari», *La rivista di pedagogia e di didattica*, 3/4, 2005, pp.135-140.
- MARTINI B., «Il valore formativo delle discipline», *Musica e storia*, XIV(3), 2006, pp. 503-509.
- MARTINI B., «Riflessioni critiche sul concetto di competenza», *Pedagogia più Didattica. Teorie e pratiche educative*, 0, 2007, pp. 101-106.
- MARTINI B., *Pedagogia dei saperi: problemi, luoghi e pratiche per l'educazione*, Franco Angeli, Milano, 2011.
- MARTINI B., «La didattica delle discipline», in M. Baldacci (a cura di), *L'insegnamento nella scuola secondaria*, Tecnodid, Napoli, 2012, pp. 37-54.

- MARTINI B., «La mente disciplinare ovvero il rapporto mente-saperi alla luce della prospettiva modularista», in G. Annacontini, R. Gallelli (a cura di), *Formare altre(i)menti*, Progedit, Bari, 2014, pp. 128-147.
- MARTINI B., «La didattica disciplinare», in M. Baldacci, E. Colicchi (a cura di), *Teoria e prassi in pedagogia. Questioni epistemologiche*, Carocci, 2016.
- MARTINI B., «La teoria didattica», in M. Baldacci, F. Pinto Minerva (a cura di), *Razionalità, educazione, realtà sociale. Studi sulla pedagogia di Franco Frabboni*, Franco Angeli, Milano, 2016, pp. 51-56.
- MASON L., *Psicologia dell'apprendimento e dell'istruzione*, Il Mulino, Bologna, 2007.
- MASON L., *Verità e certezze. Natura e sviluppo delle epistemologie ingenue*, Carocci, Roma, 2013.
- Matthews M. R., «Learning about Scientific Methodology and the “Big Picture” of Science: The Contribution of Pendulum Motion Studies», in *Philosophy of Education Yearbook*, 2001, pp. 204-213.
- MAYER M., «Immagini della scienza e dell'insegnamento» in M. Vicentini, M. Mayer (a cura di), *Didattica della fisica*, La nuova Italia, Scandicci, 1996, pp. 133-151.
- MCCLOSKEY M., «Fisica intuitiva», *Le Scienze*, 178, 1983, pp. 108-118.
- MCCLOSKEY M., «Naive Theories of Motion», in D. Gentner e A. L. Stevens (a cura di), *Mental Models*, LEA, Hillsdale (NJ), 1983, pp. 299-324.
- MCMULLIN E., «Galilean idealization», *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 16 (3), 1985, pp. 247-273.
- MESSERI L., «L'orientamento Biologico Della Linguistica Chomskiana. Grammatica Universale e Dati Sperimentali», *Annali Del Dipartimento di Filosofia*, 11, 2005, pp. 227-274.
- MICHOTTE A. (1946), *La percezione della casualità*, a cura di G. Petter, Giunti, Firenze, 1972.
- MINAZZI F., *Galileo “filosofo geometra”*, Rusconi, Milano, 1994.
- Morin E., *La testa ben fatta. Riforma dell'insegnamento e riforma del pensiero*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 2000.
- MOULINES C.U., «Approximate application of empirical theories: a general explication», *Erkenntnis*, 10 (2), 1976, pp. 201-227.
- NERSESSIAN N. J., RESNICK L. B., «Comparing Historical and Intuitive Explanations of Motion: Does “Naive Physics” have a Structure?», *Proceedings of the Cognitive Science Society* 11, LEA, Hillsdale (NJ), 1989, pp. 412-420.
- NERSESSIAN N., «Conceptual Change in Science and in Science Education», *Synthese*, 80 (1), Jul. 1989, pp.163-183.
- NEWTON I. (1697), *Principi matematici della filosofia naturale*, a cura di Alberto Pala, UTET, Torino, 1989.

- NIAZ M., «The Role of Idealization in Science and Its Implications for Science Education», *Journal of Science Education and Technology*, 8 (2), 1999, pp. 145-150.
- NIEDDERER H., BETHGE T., MEYLING H., SCHECKER H. P., «Epistemological beliefs of students in high school physics». Paper presented at the National Association of Research in Science Teaching Annual Meeting in Boston (1992), disponibile all'indirizzo Internet: <http://didaktik.physik.uni-bremen.de/niedderer/download/261992na.pdf>;
- NIEDDERER H., «Science Philosophy, Science History and the Teaching of Physics», in S. Hills (a cura di), *History and Philosophy of Science in Science Education*, 2, Ontario Queen's University, Kingston, pp. 201-214.
- NIRCHI S., «The historical development of the Didactic Transposition concept in curricular project of disciplinary knowledges», *Q-Times Webmagazine*, VI (4), 2014, pp. 1-10, consultabile all'indirizzo Internet: [http://qtimes.it/flv/Nirchi\\_Qtimes\\_VI\\_4\\_14.pdf](http://qtimes.it/flv/Nirchi_Qtimes_VI_4_14.pdf).
- NORTON J. D., «Approximation and Idealization: Why the Difference Matters», *Philosophy of Science*, 79 (2), 2012, pp. 207-232.
- NOWAK L., «The Idealizational Approach to Science: a Survey», in J. Brzeziński, L. Nowak (a cura di), *Idealization III: Approximation and Truth*. Poznań Studies in the Philosophy of Sciences and the Humanities, 25, Rodopi, Amsterdam/Atlanta, 1992, pp. 9-63.
- NOWAK L., «Remarks on the nature of Galileo's methodological revolution», in M. Kuokkanen (a cura di), *Idealization VII: Structuralism, Idealization and Approximation*, Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities, 42, Rodopi, Amsterdam/Atlanta, 1995, pp. 111-126.
- OBERLE C. D., MCBEATH M. K., MADIGAN S. C., SUGAR T. G., «The Galileo Bias: A Naive Conceptual Belief That Influences People's Perceptions and Performance in a Ball-Dropping Task», *Journal of Experimental Psychology, Learning, Memory, and Cognition*, 31(4), 2005, pp. 643-653.
- PALANO A., *Il pendolo*, materiale didattico consultabile all'indirizzo Internet: [http://www.ba.infn.it/~palano/lab/book\\_lab/it/Chap\\_3/sec\\_9/index.html](http://www.ba.infn.it/~palano/lab/book_lab/it/Chap_3/sec_9/index.html).
- PALLADINO D., PALLADINO C., *Breve dizionario di logica*, Carocci, Roma, 2005.
- PAROVEL G., *Le qualità espressive: fenomenologia sperimentale e percezione visiva*, Mimesis, Milano/Udine, 2012.
- PIAGET J., INHELDER B., *Dalla logica del fanciullo alla logica dell'adolescente*, Giunti-Barbera, Firenze, 1984.
- PIANA G., *Elementi di una dottrina dell'esperienza: saggio di filosofia fenomenologica*, Il Saggiatore, Milano, 1979.
- PIANA G., *Fenomenologia e psicologia della forma*, testo tratto dalle lezioni tenute nel 1988 per il corso di Filosofia Teoretica (Università degli Studi di Milano), disponibile all'indirizzo Internet:

[http://www.filosofia.unimi.it/~giovannipiana/psicologia\\_della\\_forma/pdf/psicologia\\_della\\_forma.pdf](http://www.filosofia.unimi.it/~giovannipiana/psicologia_della_forma/pdf/psicologia_della_forma.pdf).

PIANA G., *La notte dei lampi: quattro saggi sulla filosofia dell'immaginazione*, Guerini e Associati, Milano, 1988.

PIANA G., *Intervento su "Fisica ingenua" di Paolo Bozzi*, 1990, tenuto in occasione della pubblicazione di *Fisica ingenua* alla Casa della cultura di Milano il 21 novembre 1990, disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/epistemologia/87-intervento-sul-libro-qfisica-ingenuaq-di-paolobozzi>.

PIANA G., *I problemi della fenomenologia*, Seconda edizione con aggiornamenti bibliografici e integrazioni a cura di Vincenzo Costa, lulu.com, 2000, pp. 80-84, disponibile all'indirizzo Internet: [http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc\\_download/79-i-problemi-della-fenomenologia](http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc_download/79-i-problemi-della-fenomenologia).

PIANA G., *Commenti a Wittgenstein*, disponibile all'indirizzo Internet: [http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc\\_download/110-commenti-a-wittgenstein](http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc_download/110-commenti-a-wittgenstein).

PIANA G., *Conversazioni sulla "Crisi delle scienze europee" di Husserl*, 2013, disponibile all'indirizzo Internet: [http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc\\_download/147-conversazioni-su-qla-crisi-delle-scienze-europeeq-di-husserl](http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/component/docman/doc_download/147-conversazioni-su-qla-crisi-delle-scienze-europeeq-di-husserl).

PIANA G., *Frammenti epistemologici*, lulu.com, 2015, disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.filosofia.unimi.it/piana/index.php/epistemologia/190-frammenti-epistemologici>.

POLI R., «Astrazione e idealizzazione», *Verifiche*, 3, 1988, pp. 189-207.

POLYA G., *Come risolvere i problemi di matematica: logica ed euristica nel metodo matematico*, Feltrinelli, Milano, 1982.

POPPER K., «La teoria del pensiero oggettivo», in Id., *Conoscenza oggettiva: un punto di vista evoluzionistico*, Armando, Roma, 2002, pp. 209-255, p. 242.

POSNER G. J., STRIKE K. A., HEWSON P. W., GERTZOG W. A., «Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change», *Science Education*, 66(2), 1982, pp. 211-227.

POZO J. I., GOMEZ M. A., SANZA A., «When change does not mean replacement: different representations for different contexts», in W. Schnotz, S. Vosniadou, M. Carretero (a cura di), *New perspectives on conceptual change*, Pergamon, Amsterdam, 1999, pp. 161-175.

QUARTERONI A., «La modellistica matematica: una sintesi tra teoremi e mondo reale». Prolusione tenuta dall'autore in occasione dell'inaugurazione del 136° anno accademico presso il Politecnico di Milano (3 ottobre 1998), *Politecnico. Rivista del Politecnico di Milano*, 2, 1999, pp. 24-30, disponibile all'indirizzo Internet: [http://www.rivistapolitecnico.polimi.it/rivista/politecnico\\_rivista\\_2.24.pdf](http://www.rivistapolitecnico.polimi.it/rivista/politecnico_rivista_2.24.pdf)

- QUARTERONI A., «Modelli matematici, calcolo scientifico e applicazioni», *Rendiconti del seminario matematico Università e Politecnico di Torino*, 66(3), 2008, pp. 173-183, disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.seminariomatematico.unito.it/rendiconti/66-3/173.pdf>.
- ROSENBLUETH A., WIENER N., «Il ruolo dei modelli nella scienza», in V. Somenzi, R. Cordeschi (a cura di), *La filosofia degli automi: origini dell'intelligenza artificiale*, Bollati Boringhieri, Torino, 1994. pp. 86-92.
- ROSSI P., «Ci sono molti Galilei?», in *Un altro presente. Saggi sulla storia della filosofia*, il Mulino, Bologna, 1999, pp. 133-143.
- RUNESON S., «Constant velocity - Not perceived as such», *Psychological Research*, 37(1), 1974, pp. 3-23.
- RUSSELL B. (1903), *I Principi della Matematica*, a cura di L. Geymonat, Longanesi, Milano, 1988.
- RUSSO L., *La Rivoluzione dimenticata*, Feltrinelli, Milano, 2006.
- SCARLASSARA F., *Effetto della resistenza dell'aria sul moto dei gravi*, materiale didattico consultabile all'indirizzo Internet: [http://www.pd.infn.it/~scarlass/fisica1\\_ing/lucidi/nota\\_resistenza-aria.pdf](http://www.pd.infn.it/~scarlass/fisica1_ing/lucidi/nota_resistenza-aria.pdf)
- SHECKER H. P., «The paradigmatic change in mechanics: Implications of historical processes for physics education», *Science and Education* 1 (1), 1992, pp. 71-76.
- SCHIAFFONATI V., «Riflettere sui dettagli della scienza: Patrick Suppes e i modelli», *Epistemologia*, XXIX, 2006, pp. 239-266.
- SCHUBAUER LEONI M. L., «Rapporto al sapere del docente e decisioni didattiche in classe», in B. D'Amore (a cura di), *Didattica della matematica e realtà scolastica*. Atti dell'omonimo Convegno nazionale, Castel San Pietro Terme (1997), Pitagora, Bologna, 1997, pp. 53-60.
- SCRIVEN M., «The key property of physical laws: inaccuracy», in H. Feigl & G. Maxwell (a cura di), *Current issues in the philosophy of science*, Rinehart and Winston Holt, Rinehart and Winston, New York, 1961, pp. 91-101.
- SELLARS W., *La filosofia e l'immagine scientifica dell'uomo*, Armando, Roma, 2007.
- SETTLE, T. «Per una lettura "sperimentale" delle ricerche di Galileo sul moto», in M. Baldo Ceolin (a cura di), *Galileo e la scienza sperimentale*, Padova, Dipartimento di Fisica "Galileo Galilei", 1995, pp. 9-62.
- SHANON B., «Aristotelianism, Newtonianism and the physics of the layman», *Perception*, 5(2), 1976, pp. 241-243.
- SMITH B., CASATI R., «Naive physics», *Philosophical Psychology*, 7(2), 1994, pp. 227-247.
- SORAMEL F., *Moto armonico*, materiale didattico disponibile all'indirizzo Internet: <http://www.fisica.uniud.it/~soramel/motoarmonico.pdf>.
- SPADA H., «Conceptual change or multiple representations?», *Learning and instruction*, 4(1), 1994, pp. 113-116.

- SPERANZA F., «Contributi alla costruzione d'una filosofia non assolutista della matematica», in Id., *Scritti di epistemologia della matematica*, Pitagora, Bologna, 1997.
- SPINICCI P., *I pensieri dell'esperienza: interpretazione di Esperienza e giudizio di Edmund Husserl*, La nuova Italia, Firenze, 1985.
- SPINICCI P., *Il mondo della vita e il problema della certezza*, CUEM, Milano, 2000.
- SPINICCI P., *Problemi di filosofia della percezione*, CUEM, Milano, 2001.
- SPINICCI P., *Lezioni sulle "Ricerche filosofiche" di Ludwig Wittgenstein*, CUEM, Milano, 2002.
- SPINICCI P., «Nomi, raffigurazioni, carte geografiche», *Aut Aut*, 324, dicembre 2004, pp. 103-125. Moto armonico
- SPINICCI P., «Il mondo della vita e il problema della certezza. Riflessioni per una diversa lettura della "Crisi delle scienze europee"», in A. Ferrarin (a cura di), *Passive Synthesis and Life-World: sintesi passiva e mondo della vita*, ETS, Pisa, 2006.
- SPINICCI P., *Analitico e sintetico*, CUEM, Milano, 2007.
- STALNAKER R., «Common Ground», in *Linguistics and Philosophy*, 25, 2002, pp. 701-721.
- STRIKE K. A., POSNER G. J., «Conceptual change and science teaching», *European Journal of science education*, 4(3), 1982, pp. 231-240.
- STRIKE K. A., POSNER G. J., «A Revisionist Theory of Conceptual Change», in R. A. Duschl, R. J. Hamilton (a cura di), *Philosophy of Science, Cognitive Psychology, and Educational Theory in Practice*, State University of New York Press, Albany (NY), 1992, pp. 147-176.
- STRUMIA A., «Verso una teoria dell'analogia. Analogia e astrazione nelle scienze», *Emmeciquadro*, 6, 1999, disponibile all'indirizzo Internet: [http://emmeciquadro.euresis.org/mc2/06/mc2\\_06\\_strumia\\_teoria-analogia.pdf](http://emmeciquadro.euresis.org/mc2/06/mc2_06_strumia_teoria-analogia.pdf).
- Suárez M., «Scientific representation: Against similarity and isomorphism», *International Studies in the Philosophy of Science*, 17, 2003, pp. 225-244.
- SUPPES P., «A comparison of the meaning and uses of models in mathematics and the empirical sciences», *Synthese*, 12(2-3), 1960, pp. 287-301.
- SUPPES P., «Models of data», in E. Nagel, P. Suppes, A. Tarski (a cura di), *Logic, Methodology and the Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress*, Stanford University Press, Stanford (CA), 1962, pp. 252-261.
- TABOSSI P., «Lingue e linguaggio», in M. Zorzi, V. Girotto (a cura di), *Fondamenti di psicologia generale*, Il Mulino, Bologna, 2004, pp. 207-214;
- TARSKI A., *Undecidable Theories*, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1953.
- TELLER P., «Representation in Science» in S. Psillos, M. Curd *The Routledge Companion to the Philosophy of Science*, Routledge, London, 2008, pp. 435-441.
- TELLER P., «"Saving the Phenomena" Today», *Philosophy of Science*, 77(5), 2010, pp. 815-826.



- TIPLER P. A., *Meccanica, onde, termodinamica*, Zanichelli, Bologna, 1995.
- TOMASELLO M., *Le origini culturali della cognizione umana*, Il mulino, Bologna, 2005.
- TOMASELLO M., *Le origini della comunicazione umana*, Cortina Raffaello, Milano, 2009.
- TOMBOLATO M., «I processi di oggettivazione mediante la matematizzazione», in C. Tatasciore, P. Graziani, G. Grimaldi (a cura di), *Prospettive Filosofiche: Ontologia*, Bonanno Editore, 2012, pp. 19-30.
- TOMBOLATO M., «Il costrutto di ostacolo epistemologico per un'interpretazione in chiave didattica del rapporto fra conoscenza ingenua e conoscenza formale in fisica», *Pedagogia più didattica. Teorie e pratiche educative*, 2(1), aprile 2016.
- TONZIG G., *Fondamenti di meccanica classica*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2011.
- VAN FRAASSEN B., *L'immagine scientifica*, CLUEB, Bologna, 1985.
- VERONESI C., *Epistemologia e insegnamento della Matematica: l'eredità di Francesco Speranza*, consultabile all'indirizzo Internet: <http://matematica.unibocconi.it/articoli/epistemologia-e-insegnamento-della-matematica-leredit%C3%A0-di-francesco-speranza>.
- VICENTINI M., MAYER M. (a cura di), *Didattica della fisica*, La nuova Italia, Scandicci, 1996.
- VIENNOT L., «Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire», *Revue française de pédagogie*, 45(1), 1978, pp. 16-24.
- VOSNIADOU S., «Capturing and modeling the process of conceptual change», *Learning and instruction*, 4(1), 1994, pp. 45-69.
- VOSNIADOU S., BREWER W. F., «Mental models of the Earth: a study of conceptual change in childhood», *Cognitive Psychology*, 24(4), 1992, pp. 535-586.
- VOSNIADOU S., BREWER W. F., «Mental models of the day/night cycle», *Cognitive Science*, 18(1), 1994, pp. 123-183.
- VOSNIADOU S., *Conceptual change research: State of the art and future directions*, in W. Schnotz, S. Vosniadou, M. Carretero (a cura di), *New perspectives on conceptual change*, Pergamon, Amsterdam, 1999, pp. 3-13.
- VOSNIADOU S., «Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning», in G. M. Sinatra, P. R. Pintrich (a cura di), *Intentional conceptual change*, Lawrence Erlbaum Associates, London, 2003, pp. 377-406;
- VOSNIADOU S., «Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning», in G. M. Sinatra, P. R. Pintrich (a cura di), *Intentional conceptual change*, LEA, London, 2003, pp. 377-406.
- VOSNIADOU S., «Conceptual change research: An Introduction», in S. Vosniadou (a cura di), *International handbook of research on conceptual change*, Routledge, New York and London, 2008, pp. XIII-XXVIII.
- VOSNIADOU S., SKOPELITI I., «Conceptual Change from the Framework Theory Side of the Fence», *Science and Education*, 23(7), 2014, pp. 1427-1445.

- WEISBERG M., «Three Kinds of Idealization», *Journal of Philosophy*, 104 (12), 2007, pp. 639-659.
- WERTHEIMER M. (1945), *Il pensiero produttivo*, a cura di P. Bozzi, Giunti, Firenze, 1997.
- WHEWELL W. J. (1840), *The philosophy of the inductive sciences: founded upon their history*, Routledge/Thoemmes, London, 1996.
- WHITAKER R. J., «Aristotle is not dead: Student understanding of trajectory motion», *American Journal of Physics*, 51(4), 1983, pp. 352-357.
- WIGNER E., «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences», in *Symmetries and Reflections*, Indiana university Press, Bloomington, 1970, pp. 222-237.
- ZUCZKOWSKI A., «Intervista di Andrzej Zuczkowski a Paolo Bozzi sul problema dei rapporti tra percezione e linguaggio», in *Semantica Percettiva. Rapporti tra percezione visiva e linguaggio*, Istituti Editoriali Poligrafici Internazionali, Pisa-Roma, 1999, pp. 153-177.

## Sitografia

*Open Fisica*, [http://www.openfisica.com/fisica\\_ipertesto/onde/index.php](http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/onde/index.php)  
*Glossario di Scienza per Tutti*, <http://scienzapertutti.lnf.infn.it/php/glossario.php>  
*The MAP prOject*, [http://ppp.unipv.it/MAP/pagine/HISTO\\_01\\_it.HTM](http://ppp.unipv.it/MAP/pagine/HISTO_01_it.HTM)